



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# POSOUZENÍ KAPACITY ČERPACÍ STANICE HYDRAULICKÉHO OKRUHU LABORATOŘE

ASSESSMENT OF THE CAPACITY OF A LABORATORY STATION PUMPING STATION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mojmír Fajt

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2018



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

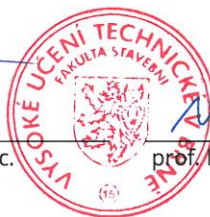
Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Mojmír Fajt
Název	Posouzení kapacity čerpací stanice hydraulického okruhu laboratoře
Vedoucí práce	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

#### PODKLADY A LITERATURA

- [1] Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C. Hydraulika pro vodohospodářské stavby, 1. vydání, SNTL Praha, 1968
- [2] Žoužela, M. Výstavba a provoz nové laboratoře Ústavu vodních staveb. Sborník příspěvků ze 3. Vodohospodářské konference 2003, Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně, 2003, str. 341-351, ISBN 80-86433-26-9
- [3] Cichra, R., Šnelerová, M., Žoužela, M. Inovace čerpací stanice Laboratoře vodohospodářského výzkumu, Prováděcí projekt strojně technologické části, LVV – FAST – VUT v Brně, 2008

#### ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Čerpací stanice B112 Ústavu vodních staveb slouží především pro výukové a výzkumné účely. Byla vybudována v roce 1998 a od té doby nebyla po strojně-technologické stránce inovována. Vzhledem ke stáří technologického vybavení je plánována její výrazná rekonstrukce. Před ní je však třeba provést přesné geometrické zaměření čerpací stanice a posouzení funkčnosti jednotlivých prvků. Součástí přípravných prací musí být i posouzení celkové kapacity čerpací stanice. Všechny tyto činnosti budou provedeny v rámci zpracování bakalářské práce.

#### STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Michal Žoužela, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT A KLÍČOVÁ SLOVA**

### ***Abstrakt***

Tato práce zajišťuje podklady pro plánovanou rekonstrukci čerpací stanice jednoho z hydraulických okruhů laboratoře B112 Ústavu vodních staveb. Tyto podklady zahrnují přesné zaměření, zaznamenané v rámci výkresové dokumentace, matematický model posouzení kapacity trubní sítě čerpací stanice hydraulického okruhu a ověření tohoto modelu pomocí několika měření pro jednotlivé, předem vybrané trasy trubního vedení. To vše je podloženo teoretickým základem pro jednotlivá témata, od teorie čerpadel až po hydrauliku kapalin v krátkých potrubích. V závěrečné části byly shrnuty výsledky a sepsána doporučení pro budoucí projekt rekonstrukce čerpací stanice.

### ***Klíčová slova***

čerpadlo, charakteristický pracovní bod, čerpací stanice, hydraulický okruh, trubní síť

## **ABSTRACT AND KEYWORDS**

### ***Abstract***

This work processes the materials for a reconstruction planned on pumping station of one of the hydraulic circuits in the B112 laboratory at Institute of Water Structures. These materials include precise surveying, recorded within a drawing documentation, a mathematical model for the assessment of the pipeline network capacity, the pumping station of hydraulic circuit and a verification of this model by several measurements for particular predefined pipeline route. This all is supported by the theoretical basis of each subject from the theory of pumps to the hydraulics of liquid of short pipes. The final part summarizes the results and gives recommendations for the further reconstruction of pumping station.

### ***Keywords***

pump, characteristic working point, pumping station, hydraulic circuit, pipe network

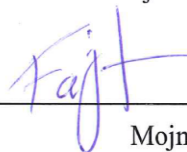
## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Mojmír Fajt *Posouzení kapacity čerpací stanice hydraulického okruhu laboratoře*. Brno, 2018. 69 stran, 7 příloh. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2018



---

Mojmír Fajt  
autor práce

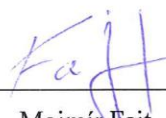
---

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2018



---

Mojmír Fajt  
autor práce

---



## PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl poděkovat za motivaci a shovívavost v průběhu celého mého snažení Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D, který mi byl nejen mentorem, ale i nekonečnou studnicí vědomostí a rad.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>HYDRAULICKÉ OKRUHY LABORATOŘE ÚSTAVU VODNÍCH STAVEB....</b>	<b>14</b>
2.1.1	Hydraulický okruh č. 1 ( místnost B121).....	14
2.1.2	Hydraulický okruh č. 2 (místnost B112).....	15
2.1.3	Hydraulický okruh č. 3 (místnost B137).....	16
2.1.4	Hydraulický okruh č.4 (budova F1).....	16
2.1.5	Hydraulický okruh č.5 .....	17
2.1.6	Ostatní okruhy .....	18
<b>2.2</b>	<b>Stávající čerpací stanice a hydraulický okruh laboratoře B112 .....</b>	<b>19</b>
2.2.1	Výtlačná potrubí .....	22
2.2.2	Křížení (spojná předloha) .....	23
2.2.3	Měrné tratě (rozvodná potrubí hydraulického okruhu) .....	23
<b>3</b>	<b>ČERPADLA, ČERPACÍ STANICE A JEJICH SPECIFIKA V OBLASTI HYDROTECHNICKÉHO VÝZKUMU.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Hydrostatická čerpadla .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Hydrodynamická čerpadla.....</b>	<b>26</b>
3.2.1	Rozdělení hydrodynamických čerpadel .....	27
3.2.2	Hlavní parametry čerpadel.....	29
3.2.3	Uspořádání čerpadel .....	31
3.2.1	Kavitace .....	32
<b>4</b>	<b>USTÁLENÉ TLAKOVÉ PROUDĚNÍ V POTRUBÍ.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Ztráty mechanické energie.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Místní ztráty mechanické energie.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Ztráty třením.....</b>	<b>35</b>
<b>4.4</b>	<b>Hydraulicky krátká potrubí.....</b>	<b>37</b>
<b>4.5</b>	<b>Motivace a cíle práce .....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Zaměření stávajícího stavu .....</b>	<b>39</b>
5.1.1	Geometrické zaměření laboratoře .....	39
5.1.2	Geometrické zaměření ČS hydraulického okruhu .....	39
<b>5.2</b>	<b>Vizuální a technické posouzení jednotlivých prvků.....</b>	<b>40</b>

---

<b>5.3</b>	<b>Posouzení kapacity čerpací stanice.....</b>	<b>49</b>
<b>5.4</b>	<b>Shrnutí závěrů .....</b>	<b>53</b>
<b>5.5</b>	<b>analýza vlivu dílčích ztrát na její celkovou hodnotu .....</b>	<b>54</b>
<b>5.6</b>	<b>Kalibrace matematického modelu .....</b>	<b>56</b>
5.6.1	Optimalizace ztrátového součinitele zpětných klapků třetí trasy .....	56
5.6.2	Optimalizace drsnosti pro výtlačná potrubí první trasy .....	57
5.6.3	Kombinovaná optimalizace .....	58
<b>5.7</b>	<b>Shrnutí závěrů optimalizací .....</b>	<b>59</b>
<b>5.8</b>	<b>Doporučení pro budoucí rekonstrukci.....</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ.....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>69</b>

# 1 ÚVOD

Tato práce vznikla na základě, v blízké budoucnosti plánované, rekonstrukce čerpací stanice jednoho z okruhů Laboratoře vodohospodářského výzkumu. Jedná se o laboratoř pod Ústavem vodních staveb Fakulty stavební (FAST) v budově B areálu univerzity. Primární využití laboratorního okruhu je dvojí. Za prvé pro účely výuky formou demonstrace různých hydraulických jevů. A za druhé pro fyzikální modelový výzkum. V této laboratoři se nachází hydraulický okruh se čtyřmi měrnými tratěmi a možným rozličným využitím dvou dvojic identických čerpadel. Pro tato čerpadla je pod podlahou laboratoře situována nádrž na užitkovou vodu se sací jímkou. Hydraulický okruh byl v minulosti vybaven frekvenčními měniči, které umožňují regulaci průtoku i simulaci jeho pozvolně se měnící hodnoty.



**Obr. 1.1 Fotografie skříňového rozvaděče v laboratoři B112 (autor: Ing. M. Žoužela Ph.D.)**

Kromě tohoto zásahu nebyly hydraulický okruh a jeho čerpací stanice nikterak renovovány od roku 1998, kdy došlo k rekonstrukci budovy B.

Před samotnou rekonstrukcí je však třeba podrobně zaměřit příslušnou část laboratoře, včetně trubní sítě, a ověřit hydraulické vlastnosti jednotlivých tratí. Na základě jejich průtokových charakteristik bude teprve možné vybrat vhodná nová čerpadla, jejichž rozměry budou přijatelné vzhledem k velikosti jímky na užitkovou vodu.

V rámci této práce je tedy nutné sestrojit, na základě geometrických rozměrů potrubí čerpací stanice, matematický model, který popíše její ztrátové charakteristiky. Tento model je současně zapotřebí ověřit (kalibrovat) sérií přímých měření. Prvními kroky však musí být vypracování teoretického základu, který určí jasný postup.

V ideálním případě bude sestrojen model takový, že následné měření charakteristického bodu čerpadla se bude dokonale shodovat s průsečíkem jeho charakteristiky.

## 2 HYDRAULICKÉ OKRUHY LABORATOŘE ÚSTAVU VODNÍCH STAVEB

V následující kapitole budou pro informaci čtenáře popsány hydraulické okruhy laboratoře Ústavu vodních staveb.

Pro modelování hydraulického a aerodynamického proudění se v laboratoři Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně využívá v současnosti pět hlavních na sobě nezávislých hydraulických okruhů, které jsou ve dvou budovách fakulty. Každý okruh je využíván pro výuku, základní nebo aplikovaný výzkum. Technické vybavení, měření a regulace jednotlivých hydraulických okruhů je díky investicím FAST nebo dotacím VUT v Brně nyní na úrovni světových laboratoří. Příslušné čerpací agregáty hydraulických okruhů jsou ovládány frekvenčními měniči s možností zásahu pomocí parametrizačních panelů, dotykových displejů, PC, vzdálených počítačů nebo jejich vzájemnými kombinacemi. Průtok jednotlivými systémy je v mnoha případech řízen pomocí PID (proporcionální-integrační-derivační) regulace, která umožní u některých okruhů také řízenou simulaci pozvolně se měnícího průtoku. Pro lepší orientaci jsou při popisu jednotlivých okruhů popisované hydraulické okruhy očíslovány od jedné do pěti.

Technologické vybavení Laboratoře vodohospodářského výzkumu (dále jen LVV) je umístěno ve dvou budovách areálu FAST. V budově B jsou první tři hydraulické okruhy, v budově F okruh č. 4 a č. 5. [10]

### 2.1.1 Hydraulický okruh č. 1 ( místnost B121)

Tento nejstarší okruh zprovozněný během první světové války nebyl do roku 2008 nijak výrazně inovován. Po rekonstrukci umožněné díky prostředkům Rozvojového projektu VUT v Brně je v současné době tvořen podzemním zásobníkem vody o objemu až 45 m<sup>3</sup>, čerpací stanicí a třemi hydraulickými měrnými žlaby. Z hlediska nátoky vody do měrných tratí (žlabů) je dodržena pro všechny jedna společná koncepce, kdy jsou před jejich nátoky situovány nádrže s měrnými přelivy Thomsonova typu. Čerpací stanice (dále jen ČS) je vybavena i tlakovým rezervním výstupem pro připojení volně stojícího modelu. ČS můžeme z technologického pohledu rozdělit na strojně-technologickou a elektro-technologickou část. Strojně-technologická část ČS obsahuje dvě ponorná odstředivá čerpadla, která jsou instalována do původní jímky. Vedení rozvodných potrubí je řešeno spolu s polohou uzavíracích klapek s ohledem na možnost současného nezávislého provozu více měrných tratí.

Elektro-technologickou část inovované ČS dělíme z technického hlediska na systém kabelových tras elektrické energie, kabelů MaR a na vlastní řídicí a vizualizační systém, umístěný ve dvou polích skříňového rozvaděče. V něm jsou umístěny rovněž měniče frekvence ponorných čerpadel s příslušenstvím.

Díky inovaci může probíhat nezávislý provoz i dvou měrných tratí současně a každou z nich lze jedním z čerpadel zásobovat maximálním čerpaným množstvím cca  $75 \text{ l.s}^{-1}$ . K ovládání řídicího systému ČS lze použít 10“ dotykového displeje, nebo je realizovatelné i ze vzdáleného počítače. [10]

### 2.1.2 Hydraulický okruh č. 2 (místnost B112)

Tento hydraulický okruh je umístěn v bývalém nezastřešeném dvorním traktu budovy B areálu fakulty, který byl na vodohospodářskou laboratoř přestavěn pravděpodobně v období kolem druhé světové války. V roce 1998 byl okruh koncepčně, z hlediska strojně-technologického, upraven do současné podoby a v roce 2009 byl inovován z hlediska ovládání a vizualizace parametrů ČS.

Okruh je stejně jako v minulosti určen pro výuku ve všech stupních studijního programu FAST a část jeho měrných tratí je využívána pro potřeby základního a aplikovaného výzkumu v rámci spolupráce s praxí na národní i mezinárodní úrovni.



Obr. 2.1.2.1 Fotografie laboratoře B112, s třemi hydraulickými tratěmi (autor: Ing. M. Žoužela Ph.D.)

Hydraulický okruh je také založen na cirkulačním principu. Pomocí čerpadel je voda z podzemní zásobní akumulární nádrže o objemu  $30 \text{ m}^3$  čerpána ocelolitinovým potrubím do čtyř měrných tratí. Rozvod vody je zároveň uzpůsoben tak, že na třech jeho místech jsou

vytvořeny odbočky, na které je možno se v případě potřeby operativně připojit. Tyto odbočky jsou využívány pro napájení větších modelů, které lze umístit a provozovat na volné ploše zkušebny. Vzhledem k tomu, že čerpací stanice tohoto hydraulického okruhu je předmětem řešení této bakalářské práce, budou bližší informace uvedeny později, viz kapitulu 2.2. [10] [11]

### **2.1.3 Hydraulický okruh č. 3 (místnost B137)**

Hydraulický okruh č. 3 se nachází v hale budovy B. Jeho technologické zázemí vzniklo v roce 1998 při rekonstrukci budovy B. Okruh je opět založen na cirkulačním principu. Tentokrát je použito monoblokové horizontální čerpadlo, které je instalováno v suché jímce. Příkon motoru čerpadla je 18,5 kW, což umožňuje dosáhnout při maximálních otáčkách průtok až  $120 \text{ l.s}^{-1}$ . Výtlak z čerpadla je opatřen prostorově přizpůsobitelným rozbočovacím kusem s celkem třemi uzávěry, na něž je možné připojit libovolné modely. Ty lze umístit na ploše  $(7 \times 6) \text{ m}$ .

Celkově malý objem vody v tomto okruhu ( $2,5 \text{ m}^3$ ) umožňuje dávkování relativně malého počtu drahých odrazných částic, jejichž přítomnost ve vodě je třeba v případech využití některých bezkontaktních optoelektronických metod (PIV – rovinná laserová anemometrie).

Zde doposud zkoušené hydraulické modely byly zaměřeny především na zkoumání vývoje proudění v kanálech pravoúhlých a kruhových průřezů při proudění tlakovém či s volnou hladinou. Důležitým faktorem je pro tato měření i požadavek na regulaci a časovou stabilitu průtoku. Tyto funkce zajišťuje měnič frekvence instalovaný ve skříňovém rozvaděči, který je ovládán parametrizačním panelem. [10]

### **2.1.4 Hydraulický okruh č.4 (budova F1)**

Hydraulický okruh č. 4 je největší hydraulický okruh LVV v budově F1 areálu fakulty. Vznikl v roce 2003 po přesunu částí technologického vybavení z areálu v Brně Kníničkách, odkud byly převezeny sklopné žlaby šířek 2,5 m a 0,4 m.

Stejně jako předešlé hydraulické okruhy je i tento založen na existenci podzemní zásobní nádrže o objemu až  $80 \text{ m}^3$ . V prohloubené části podzemní nádrže je sací jímka se čtyřmi ponornými odstředivými čerpadly. Dvěma malými o kapacitě  $2 \times 11 \text{ l.s}^{-1}$  a dvěma velkými  $2 \times 85 \text{ l.s}^{-1}$ . Koncepčně lze hydraulický okruh provozovat dvěma způsoby – v gravitačním nebo tlakovém provozu. Gravitační přístup spočívá ve využití nádrží situovaných v nejvyšší části objektu. Tyto jednoznačným způsobem zajistí velikost a stabilitu požadovaného průtoku. Tlakový systém je založen na přímém propojení výtlačných potrubí s přívody k jednotlivým měrným tratím. K začátku každé konkrétní měrné tratě je dopravena tlaková voda. V tomto režimu lze dosáhnout maximálního průtoku až  $230 \text{ l.s}^{-1}$ . Hlavní rozvody jsou realizovány v nerezovém provedení v průměrech DN 200 až DN 350. Potrubí je vystrojeno celkem 12 uzavíracími klapkami a 5 regulovatelnými šoupaty. K měření průtoku se používají indukční průtokoměry, v gravitačním režimu je průtok stanoven měrným Thomsonovým



přelivem. ČS hydraulického okruhu napájí celkem čtyři měrné tratě. Vnitřní a venkovní prostory slouží pro výstavbu největších modelů, které není možné v rámci mezních podmínek modelovatelnosti umístit do hydraulických měrných žlabů.

Hydraulický okruh je kompletně ovládán elektro-technologickým vybavením, které sestává z kabelových rozvodů EE, kabelů MaR a ze skříňového rozvaděče o čtyřech polích. V rozvaděči je vedle frekvenčních měničů umístěn i vlastní řídicí systém, který je propojený s ovládacím a vizualizačním PC, jehož pracovní plochu lze zobrazit i na vzdáleném počítači. Ovládání laboratoře je možné realizovat i ze dvou parametrizačních panelů. Systém registruje celkem asi 70 údajů elektro-technologických veličin, z nichž 24 veličin neelektrického charakteru je s pravidelnou vzorkovací periodou 15 s archivováno.

Regulace průtoku do jednotlivých měrných tratí je v automatickém režimu řízena PID regulátorem, přičemž dosažení požadovaného průtoku lze očekávat v tlakovém provozu zpravidla do 1,5 min. Díky této „pružné“ regulaci systému je možné stejně jako v případě hydraulického okruhu č. 1 simulovat pozvolně se měnící průtok. Systém umožňuje v tlakovém režimu napájení současně až tří měrných tratí. [10]

## 2.1.5 Hydraulický okruh č.5

Hydraulický okruh č. 5 se nachází v budově F areálu fakulty. Je to systém určený pro experimentální část hydrauliky podzemních vod. Jde o relativně malý hydraulický okruh, který byl podstatně inovován v roce 2008. Slouží pro vizualizaci jevů souvisejících s filtračními deformacemi materiálů (soudržných či nesoudržných) a pro stanovení jejich vybraných hydraulických charakteristik. Nejčastěji se jedná o stanovení součinitele hydraulické vodivosti zkoušeného materiálu či stanovení časové změny tohoto parametru při deformaci vnitřní struktury materiálu nebo proudění v nenasycené zóně.

Hydraulický systém se skládá ze zásobní nádrže vody, horní polohovatelné gravitační nádrže, dvou čerpadel, lavice s testovacími válci a ostatního nutného zařízení, které je třeba pro řízení a vyhodnocení prováděných experimentů. Systém lze provozovat v režimu gravitačním a tlakovém. V případě gravitačního režimu je voda vyčerpána do výškově polohovatelné horní gravitační nádrže, odkud je pak dopravena k vlastnímu zkoušenému vzorku materiálu. V případě, že jsou při experimentu požadovány vyšší tlaky, provozuje se systém v režimu tlakovém. V tomto případě lze dosáhnout přetlaku až 60 m v. sl. za průtoků od 0 l.s<sup>-1</sup> až k 3,3 l.s<sup>-1</sup>. [10]

### **2.1.6 Ostatní okruhy**

Jedná se především o hydraulický okruh pro kalibraci vodoměrných vrtulí a o dva okruhy pro aerodynamické modelování. Jsou to okruhy mobilního charakteru a více informací o nich lze získat v [10].

## 2.2 STÁVAJÍCÍ ČERPACÍ STANICE A HYDRAULICKÝ OKRUH LABORATOŘE B112

Jak již bylo psáno v kapitole 2.1.2, hydraulický okruh se nachází nad jímkou o celkovém objemu 30 m<sup>3</sup>, která slouží jako zásoba užitkové vody pro laboratoř. Sací jímka je rozdělena na dvě části. Pro dvě větší čerpadla je jímka pod úrovní podlahy hluboká 2,20 m a půdorysný rozměr je (1,67 x 1,08) m. Poté následuje stupeň ve dně, který odděluje druhou část jímky pro dvě menší čerpadla. Tento stupeň je vysoký 0,39 m a hloubka druhé části, o půdorysném rozměru 1,82 x 1,08 m, je 1,63 m. V době měření byla hladina vody 0,25 m pod úrovní podlahy v laboratoři. Celá jímka je vyhotovena z betonu, přičemž její strop, tvořený ocelovými plechovými poklopy, zároveň působí jako podlaha laboratoře.

Čerpací stanice této laboratoře je vybavena čtyřmi čerpadly odstředivého typu značky Zenit, dvě o kapacitě 12 l.s<sup>-1</sup> a dvě o kapacitě 95 l.s<sup>-1</sup>. Štítkové parametry všech čtyř čerpadel jsou jen těžko rozpoznatelné, což je zřejmé z Obr. 2.2.1. Dopravní výška se liší podle vybrané tratě hydraulického okruhu. V průběhu řešení praktické části byly štítky z čerpadel sejmuty a vyčištěny, viz kapitolu 5.2, a obrázky 5.2.1 a 5.2.2.



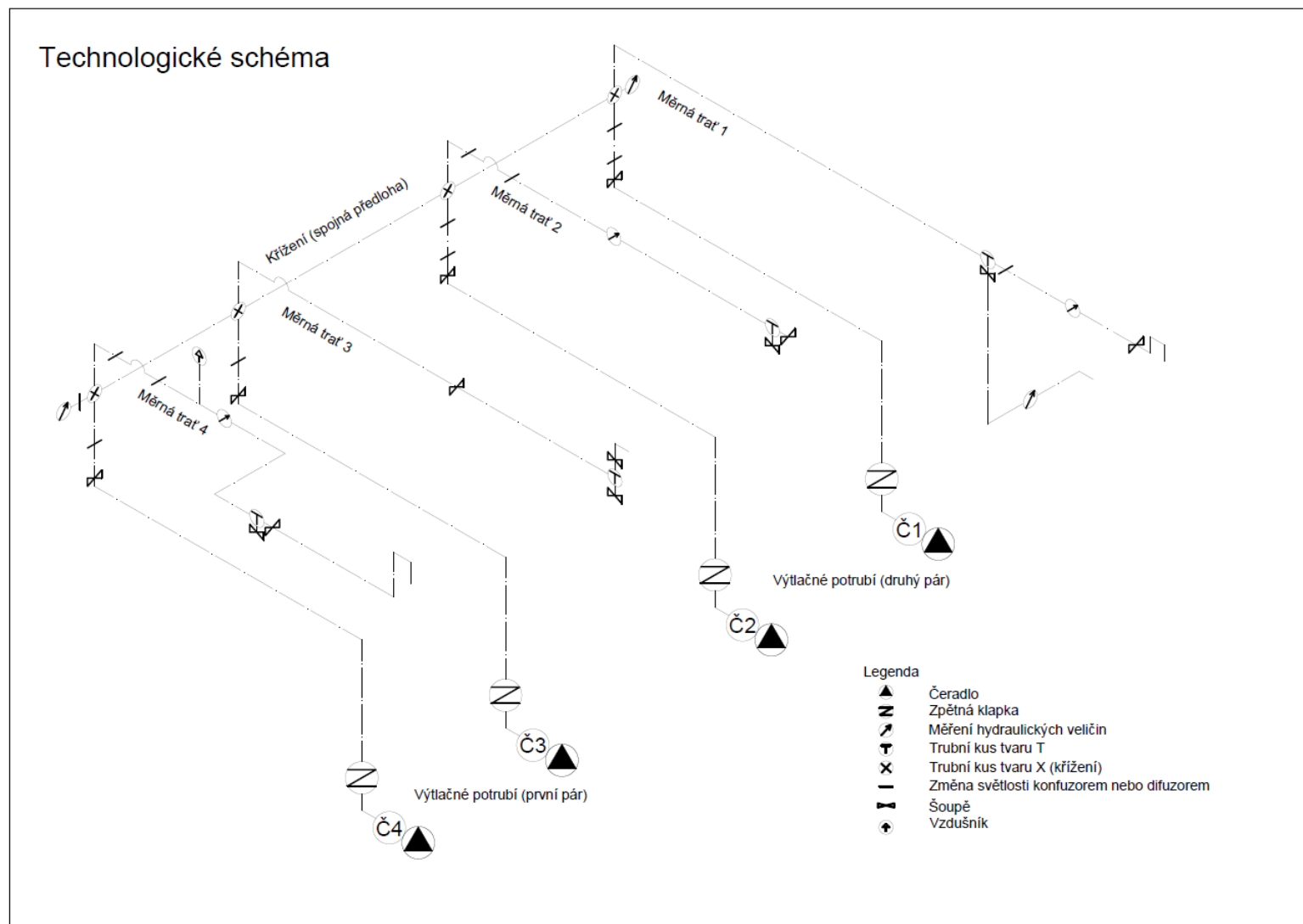
Obr. 2.2.1 Čerpadla Zenit při čištění jímky (autor: Ing. M. Žoužela, Ph.D.)

Elektro-technologická část ČS hydraulického okruhu je řešena velmi podobně jako v případě okruhu č. 1. Veškeré elektro prvky jsou instalovány ve skříňovém rozvaděči. V něm jsou umístěny rovněž dva frekvenční měniče a řídicí systém, který je v tomto případě integrován do 6“ vizualizačního dotykového panelu, jehož plocha je zobrazitelná také na vzdáleném počítači. Z počtu dvou frekvenčních měničů vyplývá i samotný systém řízení ČS. A to takový, že pro regulování škály průtoků slouží jedno malé a jedno velké čerpadlo, obě napojené na frekvenční měniče, a zbylá dvě (jedno malé a jedno velké) čerpadla fungují na bázi zapnuto / vypnuto. Kombinací jednotlivých čerpadel čerpajících do různých tratí čerpací stanice tak lze dosáhnout škály průtoků, od minimálních ( $5 \text{ l.s}^{-1}$ ) až po ty maximální (cca  $200 \text{ l.s}^{-1}$ ).



**Obr. 2.2.2 Skříňový rozvaděč s frekvenčními měniči (autor: Ing. M. Žoužela, Ph.D.)**

Samotná trubní síť hydraulického okruhu se dá rozdělit do tří částí. Na výtlačná potrubí, křížení a na měrné tratě. Technologické schéma s popsány jednotlivými trubními kusy se nachází v příloze 7. [10] [11]



Obr. 2.2.3 Technologické schéma trubní sítě hydraulického okruhu (autor: Mojmír Fajt)

### 2.2.1 Výtlačná potrubí

Výtlačná potrubí jsou párová, tedy vždy po dvou ve stejném provedení. První pár výtlačků začíná čerpadly značky Zenit, každé o jmenovité kapacitě  $95 \text{ l.s}^{-1}$ , umístěných 2200 mm pod podlahou laboratoře, tedy v nejhlubší části sací jímky. Dále pokračuje kolenem, zpětnou klapkou a rovným kusem o délce 2000 mm. Následuje opět koleno a tři přímé kusy o celkové délce 1720 mm. Posledními kusy jsou koleno, šoupě a difuzor. Celý tento výtlak je veden v DN 125 z potrubí z tvárné litiny od firmy HAWLE. Difuzor končí dimenzí DN 200. Následuje část hydraulického okruhu, v této práci nazvaná jako Křížení (kapitola 2.2.2).



Obr. 2.2.1.1 Fotografie výtlačných potrubí (autor: Ing. M. Žoužela, Ph.D.)

Druhý pár výtlačného potrubí je řešen obdobně jako pár první. Počátek je v hloubce 1630 mm pod podlahou laboratoře u čerpadel značky Zenit s jmenovitou kapacitou  $2 \times 12 \text{ l.s}^{-1}$ . Následuje koleno a zpětná klapka. Dále pokračuje jediný (pár), pevně svařený úsek potrubí, a to kombinace dvou přímých kusů a kolene na obou volných koncích zakončený přírubovým spojem. Posledními kusy jsou opět koleno, šoupě a v tomto případě dva difuzory, postupně měnící dimenzi potrubí z DN 65 na DN 200.

Celkový pohled na oba páry výtlačných potrubí je zpracován v příloze 6. [10] [11] [12]



### 2.2.2 Křížení (spojná předloha)

Jedná se o propojení jednotlivých výtlačků a navazujících měrných tratí mezi sebou. To vše pomocí čtyř přírubových křížů DN 200 a jednoho přímého kusu o délce 800 mm a DN 200. Tento kus je situován mezi dvě dvojice výtlačných potrubí popsaných v kapitole 2.2.1. Na obou volných koncích je pak dále realizováno měření aktuálních tlakových poměrů. Grafické zpracování předmětné části se nachází v příloze 6. [10] [11] [12]



Obr. 2.2.2.1 Fotografie přechodu výtlačných potrubí na křížení (autor: Ing. M. Žoužela, Ph.D.)

### 2.2.3 Měrné tratě (rozvodná potrubí hydraulického okruhu)

Hydraulický okruh v laboratoři B112 zahrnuje čtyři rozvodná potrubí hydraulického okruhu, dále nazvaná jako měrné tratě, které díky soustavě šoupat mohou fungovat samostatně nebo v různých kombinacích. Toto označení bylo zvoleno především pro fakt, že je zde měřen průtok daným úsekem. Samotný hydraulický jev a jeho parametry jsou měřeny až v jednotlivých měrných žlabech hydraulického okruhu. V následujících podkapitolách (podkapitoly 1, 0, 3 a 4) budou popsány jednotlivé měrné tratě v pořadí zprava doleva při pohledu od vstupu do laboratoře (nebo při pohledu na technologické schéma). Jednotlivé měrné tratě se však často mění a přizpůsobují potřebám nových modelů, proto zde popsané složení nemusí být dlouhodobě aktuální. Pro zřetelný a snadno pochopitelný popis budou jednotlivé singularity a přímé kusy vypsány do tabulek (Tabulka 2.2.3.1, Tabulka 2.2.3.2, Tabulka 2.2.3.3) v pořadí, v jakém na sebe navazují. V případě, že u měrné trati existuje více variant vedení, je do tabulky vybrána delší varianta. Tabulky jsou podkladem pro výpočty, proto mají některé armatury uvedenou délku rovnou nule, tím se eliminuje výpočet ztráty třením, která je již zahrnuta v místní ztrátě. Jejich reálná délka je však nulová. [10] [11] [12]

## 1. Měrná trať

Tato měrná trať má několik variant. Pro následná kontrolní měření byla vybrána proto, že je nejdelší, s největší světlostí. U pátého kusu v pořadí (T-kus) je možnost alternativního vedení měrné trati v DN 100, a to přes redukci difuzorem z DN 200 na DN 100, poté dvěma přímými kusy, sloužícími jako uklidňovací délky pro průtokoměr. Celá tato alternativní měrná trať je zakončena třemi koleny DN100, která umožňují přívod vody do mobilního měrného žlabu.

**Tabulka 2.2.3.1 Primární trubní složení měrné trati 1**

L1=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 200
L2=	2000 mm	=	2 m	Přímý kus	DN 200
L3=	0 mm	=	0 m	T- kus	DN 200
L4=	0 mm	=	0 m	Šoupě	DN 200
L5=	800 mm	=	0,8 m	Přímý kus	DN 200
L6=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 200
L7=	1710 mm	=	1,71 m	Přímý kus	DN 200
L8=	0 mm	=	0 m	Průtokoměr	DN 200
L9=	450 mm	=	0,45 m	Přímý kus	DN 200
L10=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 200

Tato měrná trať je zaznamenána v přílohách 3 a 4. Pro praktickou část byla vybrána tato měrná trať jako zakončení všech tras, určených pro kontrolní měření modelu.

## 2. Měrná trať

Tato měrná trať přechází z části Křížení pomocí kolene DN 200 do horizontálního směru. Následují dva difuzory, které postupně mění světlost až na DN 65. Další je přímý kus o délce 480 mm sloužící jako uklidňovací délka pro průtokoměr. Za tímto průtokoměrem následuje další přímý kus, tentokrát o délce 2120 mm. Zakončení této měrné trati je realizováno T-kusem s šoupaty na obou volných koncích. Jeden konec je v horizontálním směru a druhý ve směru kolmém, tj. směrem k zemi.



### 3. Měrná trať

U této měrné trati podobně jako u 1. a 2. je i zde možnost dvou různých zakončení, a to po T-kusu, obě možnosti jsou na volném konci tohoto trubního kusu uzavřeny šoupětem. Podobně jako u 2. měrné trati.

**Tabulka 2.2.3.2 Primární trubní složení měrné trati 3**

L1=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 200
L2=	2000 mm	=	2 m	Přímý kus	DN 200
L3=	0 mm	=	0 m	Šoupě	DN 200
L4=	800 mm	=	0,8 m	Přímý kus	DN 200
L5=	0 mm	=	0 m	T-kus	DN 200
L6=	0 mm	=	0 m	Šoupě	DN 200

### 4. Měrná trať

Tato měrná trať se od předchozích tří liší tím, že zakončení je fixně dáno modelem pro Reynoldsův pokus. Na trubním kusu č. 4 se nachází vzdušník pro odstranění přebytečného vzduchu v celé soustavě čerpací stanice hydraulického okruhu. I u této měrné trati je druhá možnost vedení měrné trati, například do mobilního žlabu, a to u trubního kusu č. 11, zakončeného na volném konci šoupětem.

**Tabulka 2.2.3.3 Primární trubní složení měrné trati 4**

L1=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 200
L2=	0 mm	=	0 m	Difuzor	DN 100
L3=	0 mm	=	0 m	Difuzor	DN 65
L4=	480 mm	=	0,48 m	Přímý kus	DN 65
L5=	0 mm	=	0 m	Průtokoměr	DN 65
L6=	700 mm	=	0,7 m	Přímý kus	DN 65
L7=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 65
L8=	1120 mm	=	1,12 m	Přímý kus	DN 65
L9=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 65
L10=	300 mm	=	0,3 m	Přímý kus	DN 65
L11=	0 mm	=	0 m	T-kus	DN 65
L12=	0 mm	=	0 m	Šoupě	DN 65
L13=	1840 mm	=	1,84 m	Přímý kus	DN 65
L14=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 65
L15=	800 mm	=	0,8 m	Přímý kus	DN 65
L16=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 65
L17=	220 mm	=	0,22 m	Přímý kus	DN 65
L18=	0 mm	=	0 m	Koleno	DN 65

### **3 ČERPADLA, ČERPACÍ STANICE A JEJICH SPECIFIKA V OBLASTI HYDROTECHNICKÉHO VÝZKUMU**

Čerpadla jsou zařízení určená k dopravě kapalin. Přeměňují mechanickou energii na energii hydraulickou. Globálně se čerpadla dělí na hydrodynamická, která kapalině udělí rychlost, a hydrostatická, u nichž dochází k transformaci energie rovnou do tlaku. Další skupina čerpadel je zcela mimo toto rozdělení a tvoří tak vlastní kategorii, často označovanou jednoduše jako "ostatní", sem patří například čerpadla mamutková, která vytlačují kapalinu pomocí dávkování stlačeného vzduchu. Protože se v laboratoři nacházejí čerpadla hydrodynamická, bude jim v následující kapitole věnována pozornost. [7] [8] [9] [2]

Pojem čerpací stanice zahrnuje v podstatě seskupení čerpadel, často různých typů, za účelem dopravy vody různé kvantity. Možnostem kombinování čerpadel je věnována podkapitola 3.2.3.

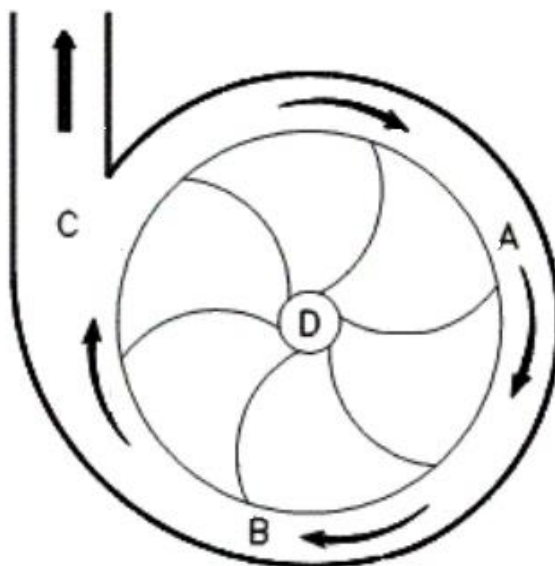
Na tomto místě je třeba zmínit rozdíl mezi klasickým vodárenským využitím čerpadel a využitím pro hydrotechnický výzkum. Na rozdíl od vodárenství, kde cena a výkon hrají hlavní roli a drobné odchylky od průtoku nejsou závažné, u hydrotechnického výzkumu je na prvním místě přesnost a stálost průtoku i za cenu nižší účinnosti čerpadla. Současně je třeba čerpací stanice hydraulických okruhů a samotná čerpadla provozovat v širokém rozsahu průtoků většinou za pomoci měniče frekvencí s tím, že řídicí frekvence se obvykle pohybují od (15 – 60) Hz. [14]

#### **3.1 HYDROSTATICKÁ ČERPADLA**

Typické pro hydrostatická, též známá jako objemová čerpadla, je převod mechanické energie přímo na energii tlakovou s tím, že kinetická energie kapaliny je méně významná. K translukaci kapaliny dojde v důsledku pohybu výtláčného tělesa, například šroubu, pístu, membrány a podobně. [7] [8] [9] [2]

#### **3.2 HYDRODYNAMICKÁ ČERPADLA**

Princip hydrodynamických nebo také odstředivých čerpadel spočívá v urychlení kapaliny. Jedná se tedy o nepřímou přeměnu mechanické energie na energii kinetickou a potenciální energii kapaliny. Jádrem celého čerpadla je oběžné kolo, které svými otáčkami a tvarem vytváří podtlak na návodní straně a na druhé straně přetlak. Kapalina, která se dostane do čerpadla mezi lopatky oběžného kola, je vlivem odstředivé síly tlačena ven z oběžného kola, které jí při tom dává stále více energie, čím její rychlost, případně i tlak rostou.



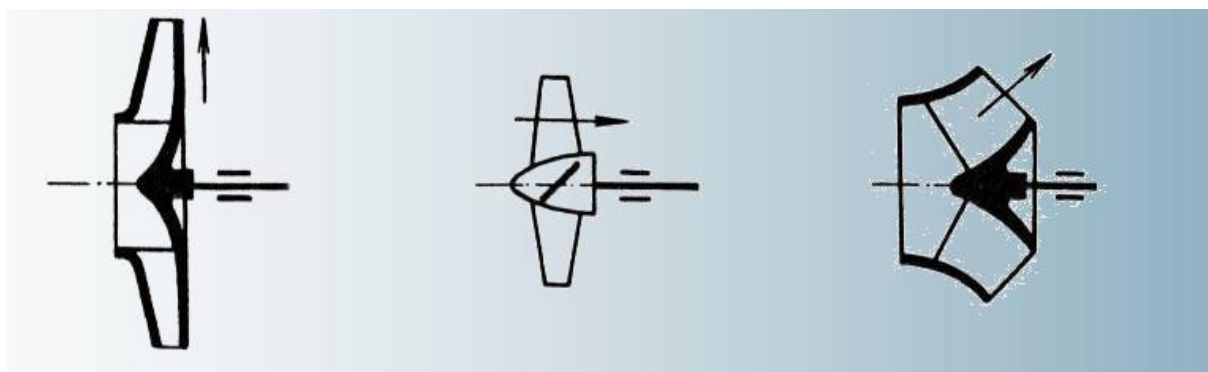
Obr. 3.2.1 Schéma odstředivého čerpadla [16]

Na Obr. 3.2.1 je vidět hřídel (D) a směr odtoku přirychleného proudu kapaliny ve spirálové komoře (A, B). Poslední bod (C) znázorňuje výstupní otvor. Odstředivá čerpadla jsou v případě, kdy nejsou poháněna (nebo roztáčena) krouticím momentem na hřídeli D, průtočná oběma směry. Tomuto lze bránit například zpětnou klapkou na výstupu C, nebo jiným typem uzávěru.

Odstředivá čerpadla mají velmi dobré vlastnosti při čerpání vody, a to jak čisté, tak i znečištěné. Jejich účinnost může dosáhnout až 90 %. Jsou určena především pro celou škálu průtoků od desetin litrů až po jednotky  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . [7] [8] [9] [2]

### 3.2.1 Rozdělení hydrodynamických čerpadel

Primární rozdělení čerpadel je podle směru průtoku čerpané kapaliny, a to na radiální, axiální a diagonální.



Obr. 3.2.1.1 Směr průtoku zleva: radiální, axiální a diagonální [2]

Dále se čerpadla dají dělit podle různých parametrů. Například podle polohy osy oběžného kola na čerpadla vertikální nebo horizontální. Nebo podle umístění na čerpadla do suché nebo mokré jímky. Čerpadlům umístěným do mokré jímky se také říká čerpadla ponorná. Další, ne však poslední možností dělení, je podle počtu stupňů na jednostupňová a vícestupňová. Počet stupňů v podstatě znamená počet oběžných kol, která jsou za sebou seřazena v sérii (popsáno níže v kapitole 3.1.3 Uspořádání čerpadel). [7] [8] [9] [2]

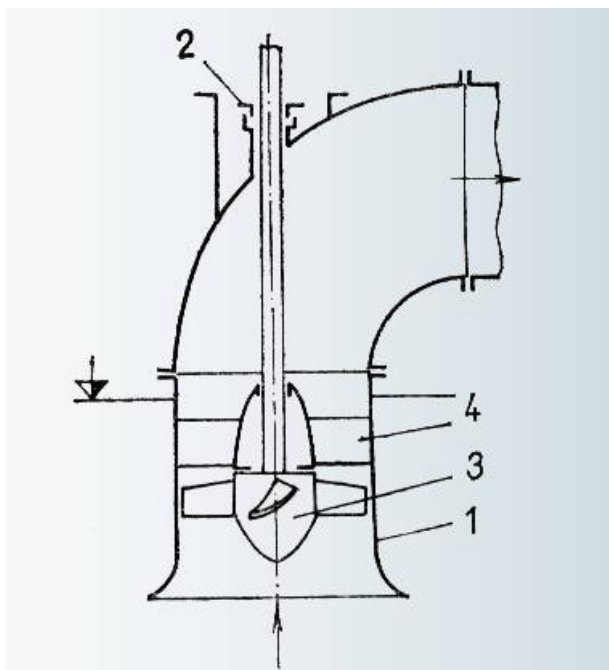
### ***Radiální hydrodynamická čerpadla***

Jedná se o nejrozšířenější typ hydrodynamických čerpadel. Tento typ se zpravidla skládá ze tří částí, a to z difuzoru, oběžného kola a spirální skříně. Natočení lopatek oběžného kola se liší podle daného typu čerpadla. Od lopatek je přiváděna kapalina na stěny spirální skříně, která má tvar postupně se rozšiřujícího zakřiveného kanálu, a tudy je kapalina dále vedena do výtlačného hrdla. Zde již kapalina ztrácí svou kinetickou energii, která je přeměněna na energii tlakovou.

Difuzor je pevný lopatkový kruh, jehož lopatky se postupně rozšiřují. Je umístěn mezi oběžné kolo a spirální skřín. Obklopuje oběžné kolo a používá se především tehdy, kdy je třeba část kinetické energie přeměnit na energii tlakovou již před výtlačnou částí. Tento prvek však není nezbytný a u jednoduchých radiálních hydrodynamických čerpadel bývá vynechán. [7] [8] [9] [2]

### ***Axiální hydrodynamická čerpadla***

Z důvodu tvaru oběžného kola bývají také označována jako vrtulová čerpadla. Jejich využití směřuje zpravidla tam, kde je potřeba vysokých průtoků s nižší dopravní výškou. Na oběžném kole bývá umístěno dvě až šest lopatek bez či s možností regulace, jako tomu bývá například u Kaplanových turbín. Natáčivé lopatky se pak využívají pro regulaci průtoku čerpadlem. [7] [8] [9] [2]



Obr. 3.2.1.2 Schéma vertikálního axiálního hydrodynamického čerpadla [2]

- Kde
- |   |                              |
|---|------------------------------|
| 1 | ... válcová skříň,           |
| 2 | ... ucpávka,                 |
| 3 | ... oběžné kolo,             |
| 4 | ... pevné lopatky převaděče. |

### ***Diagonální hydrodynamická čerpadla***

Díky své konstrukci tvoří jistý přechodný prvek mezi hydrodynamickými čerpadly radiálními a axiálními. Tomu odpovídá i oblast jejich využití. Provedení oběžného kola je spíše bližší axiálním čerpadlům. Hned za oběžným kolem se nachází spirální skříň, nebo lopatky převaděče. [7] [8] [9] [2]

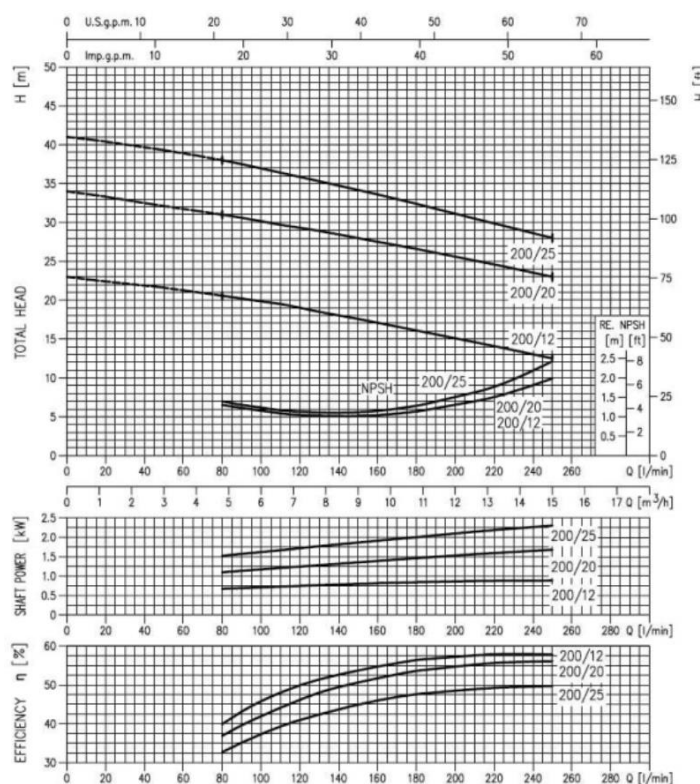
### **3.2.2 Hlavní parametry čerpadel**

Využití čerpadel je velice rozsáhlé a mezioborové, od lékařství až po čištění odpadní vody, proto se od sebe samozřejmě čerpadla konstrukčně liší. Účelu odpovídá typ čerpadla a jeho parametry. To vše vyplývá z návrhu a hydraulických výpočtů. Mezi hlavní parametry čerpadla patří průtok, dopravní výška, sací výška, výkon, účinnost, otáčky a NPSH charakteristika (*Net positive Suction Head*), která charakterizuje sací schopnost čerpadla a do jisté míry vystihuje oblast vzniku kavitace. Dalšími podstatnými ukazateli jsou také přípustné

vlastnosti kapaliny jako její viskozita nebo teplota. Na základě příslušných parametrů jsou dále konstruovány charakteristiky čerpadel.

V průběhu návrhu čerpadla dochází k porovnání těchto charakteristik čerpadla s charakteristikou konkrétního hydraulického okruhu. V průsečíku těchto charakteristik se nachází takzvaný návrhový pracovní bod čerpadla. Při výběru čerpadla je pak volen takový typ, jehož pracovní bod je návrhovému blízký, avšak je mírně posunutý do oblasti vyššího výkonu a vyššího průtoku. Tím vzniká oblast jistoty pro možnou odchylku od návrhových hodnot. Pracovní bod čerpadla se také nachází nad charakteristikou účinnosti, a to zpravidla v jejím maximu. Protože však čerpadlo nečerpá po dobu svého užívání stále konstantní průtok, je vymezena takzvaná „optimální“ oblast. Jedná se o oblast průtoků v okolí pracovního bodu, od minimálního po maximální průtok, které jsou odchýleny od optimálního průtoku zpravidla o dvacet procent. V atypických případech jsou pracovní oblasti výrazně užší, především pak u čerpadel se stálým konstantním průtokem, kde často dojde například k úpravě lopatek oběžného kola. Tím je dosaženo vyšší účinnosti.

Zde je nutné dodat, že v oblasti hydrotechnického výzkumu se čerpadla pohybují ve výrazně větších rozsazích čerpaného množství, a proto se s optimální oblastí často uvedeným způsobem nepracuje. Je to dáno především použitím frekvenčních měničů, které často posunou pracovní charakteristiku čerpadla, resp. jeho pracovní bod do účinnosti v řádech desítek procent. Jak bylo zmíněno v kapitole 3, priorita je kladena na dosažení a udržení přesného a především stabilního průtoku, nutného pro konkrétní experiment. [7] [8] [9] [2]



Obr. 3.2.2.1 Charakteristika tří čerpadel [6]

Na Obr. 3.2.2.1 je vidět pracovní charakteristika řady tří čerpadel čerpadla, jak ji udává jeden z výrobců ve svém katalogu. V tomto případě byly pouze pro ilustraci vybrány náhodné charakteristiky.

### **3.2.3 Uspořádání čerpadel**

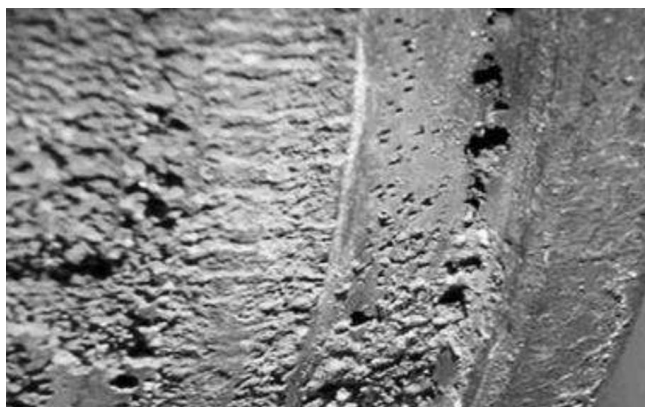
V případě použití více čerpadel jsou dvě možnosti jejich konstrukčního zapojení do hydraulické trati – sériově anebo paralelně. V případě sériového zapojení jde o zařazení jednotlivých čerpadel za sebou, čímž se zvyšuje dopravní výška, ale čerpané množství je jen mírně vyšší. Naopak u paralelního zapojení jsou čerpadla na samostatných větvích a čerpané množství je větší, zatímco dopravní výška zůstává téměř stejná. Pokles dopravní výšky je dán ztrátou energie (popsáno v kapitole 4.1 Ztráty mechanické energie). Velikost navýšení, ať už čerpaného množství nebo dopravní výšky, je přibližně rovna součtu daného parametru všech zapojených čerpadel.

V případě, kdy je zapojeno vícero čerpadel, lze využít mnoha způsobů, jak jednotlivá čerpadla spouštět. To se odvíjí od samotného účelu a provozních požadavků. Jednou z možností je takzvané kaskádové spouštění. Za prvé s plynulou regulací, kde je v řadě za sebou zapojeno více čerpadel. První čerpadlo je vybaveno frekvenčním měničem a při zvyšování nebo snižování potřeby vody je určeno k regulaci. Zbýlá čerpadla pak dodávají jen maximální nebo žádný průtok. Druhou možností je spouštění s konstantními otáčkami, kde při zapojení a odpojení čerpadla dochází k výraznému výkonnostnímu skoku.

Další možností je regulace přes tlakovou komoru, která má akumulární funkci, a dále čidlo, které dává signál podle tlaku v komoře, kdy je třeba soustavu čerpadel sepnout a kdy vypnout.  
[7] [8] [9] [2] [16]

### 3.2.1 Kavítace

Tento hydraulický proces popisuje jev, kdy dojde v kapalině k poklesu tlaku do takové míry, že se začne kapalina odpařovat, čímž dojde ke vzniku bublin. Tyto bubliny jsou tvořeny nasycenými parami. Jak jsou unášeny proudem, spojují se a vytvářejí v proudu kavitační dutiny, které, když se dostanou do oblasti vyššího tlaku, implodují. Tento jev je doprovázen akustickými projevy, ale především v místě imploze vysokou teplotou, která dle některých autorů [4] dosahuje až desítek tisíc stupňů Celsia. Pokud k tomuto jevu dojde například na lopatkách oběžného kola čerpadla, je jejich materiál vystaven extrémnímu namáhání a rozrušování. Samotná životnost kavitačních bublin je pak přibližně 0,006 s, avšak během tohoto krátkého okamžiku bublina zhruba pětkrát až šestkrát vznikne a znovu zanikne. [3] [4]



Obr. 3.2.1.1 Kavitační rozrušený povrch [3]



## 4 USTÁLENÉ TLAKOVÉ PROUDĚNÍ V POTRUBÍ

Proudění je pohyb tekutiny, kdy se částice pohybují neuspořádaným pohybem a zároveň se posouvají ve směru proudění. Za proudění ustálené (stacionární) je označováno proudění takové, jehož hydraulické veličiny ( $Q$ ,  $v$ ,  $A$ ) nejsou funkcí času. K tlakovému proudění dochází při vedení vody potrubím, kdy dojde k úplnému zatopení a proudění neprobíhá o volné hladině. Vlastnosti tlakového proudění jsou závislé především na materiálu potrubí, přesněji jeho drsnosti, na teplotě dopravovaného média a jeho viskozitě, dále pak na průměru potrubí a na průřezové rychlosti. U tlakového proudění, na rozdíl od proudění o volné hladině, převládá vliv tlakového gradientu a nezáleží tedy na sklonu potrubí.

Výpočet ustáleného tlakového proudění v úseku reálného potrubí je aplikací zákona zachování mechanické energie, vyjádřeného pomocí Bernoulliho rovnice,

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + Z . \quad (4.0.2)$$

Kde  $\alpha$  ... Coriolisovo číslo,  
 $v$  ... průřezová rychlost,  
 $p$  ... tlak,  
 $\rho$  ... hustota,  
 $g$  ... tíhové zrychlení,  
 $1,2$  ... indexy, označující jednotlivé průřezy.

Dále pak ze zákona zachování hmotnosti v podobě rovnice kontinuity v 1D a nahrazení skutečného rozdělení rychlostního pole v příčném průřezu pomocí průřezové rychlosti bude

$$v_1 = v_2 \cdot \frac{S_2}{S_1} . \quad (4.0.1)$$

Kde  $v_i$  ... průřezová rychlost,  
 $S_i$  ... plocha průřezu,  
 $1,2$  ... indexy, označující jednotlivé průřezy. [5] [1] [13]

## 4.1 ZTRÁTY MECHANICKÉ ENERGIE

Při pohybu kapaliny potrubím dochází k různým ztrátám mechanické energie. Tyto ztráty lze rozdělit do dvou kategorií, podle způsobu ztráty energie na ztráty místní a ztráty třením po délce. Celkovou ztrátu pak lze vyjádřit jako sumu všech ztrát. V praktické části je pro ztráty použit symbol  $H_z$ .

$$Z = \sum Z_t + \sum Z_m . \quad (4.1.1)$$

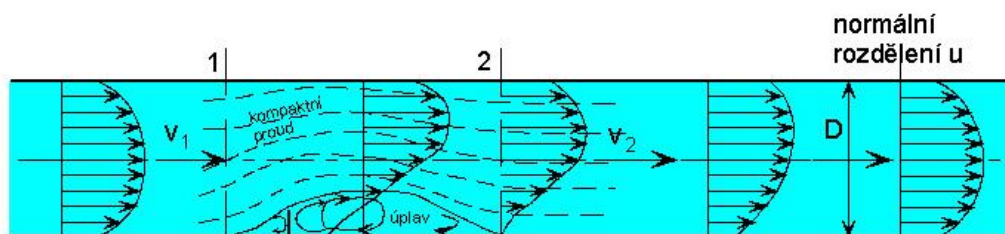
Kde  $Z$  ... celková ztráta energie,

$Z_t$  ... ztráta třením,

$Z_m$  ... ztráta místní. [5] [1] [13]

## 4.2 MÍSTNÍ ZTRÁTY MECHANICKÉ ENERGIE

Místní ztráta mechanické energie je přímým důsledkem deformace rychlostního pole. Příčinou může být například překážka v potrubí působící na proudění, nebo změna směru proudění.



Obr. 4.2.1 Vliv překážky na rychlostní pole [1]

Na Obr. 4.2.1 je vidět ovlivnění rychlostního pole překážkou. Je také patrné, že k ovlivnění rychlostního pole nedochází bodově, ale na delším úseku. Délka tohoto úseku se řádově pohybuje mezi deseti- až stonásobkem průměru potrubí. V praxi však dochází ke zjednodušení výpočtu a celková hodnota ztrátové výšky se přisuzuje profilu překážky. Ke ztrátě energie tedy dochází skokově. [1]

Velikost ztráty mechanické energie je závislá na rychlosti a na součiniteli místní ztráty, který je zpravidla tabelován anebo je jeho hodnota dostupná u výrobce dané singularity (armatury).

$$Z_m = \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.2.1)$$

Kde  $Z_m$  ... ztráta místní,  
 $\xi$  ... součinitel místní ztráty,  
 $v$  ... průřezová rychlost,  
 $g$  ... tíhové zrychlení.

Typickými singularitami, kde dochází k místním ztrátám energie, jsou například sací koše, zúžení nebo rozšíření průřezu potrubí, změna směru potrubí (kolena), uzávěry pro regulaci průtoku, zpětné klapky a další. [5] [1] [13]

### 4.3 ZTRÁTY TŘENÍM

Tento typ ztráty energie je především způsoben drsností povrchu trubního materiálu, kterým proud protéká, vzájemným působením částic kapaliny mezi sebou. Velikost ztráty energie je závislá na délce potrubí, kterým proud protéká, a nepřímo úměrná jeho průměru, dále pak na druhé mocnině průřezové rychlosti

$$Z_t = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.3.1)$$

Kde  $Z_t$  ... ztráta třením,  
 $\lambda$  ... součinitel ztráty třením,  
 $L$  ... délka úseku,  
 $D$  ... průměr trubky,  
 $v$  ... průřezová rychlost,  
 $g$  ... tíhové zrychlení.

Pro určení součinitele  $\lambda$  existuje vícero postupů, například odečet z Moodyho diagramu. Nejpresnější, a v této práci použitý postup, je však výpočet iterační metodou.

Prvním krokem je určení oblasti proudění podle Reynoldsova kritéria ( $Re$ ). To svou hodnotou určí, o jaký typ proudění se jedná. Jeho hodnota je závislá na průřezové rychlosti, průměru potrubí a na viskozitě kapaliny.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (4.3.3)$$

Kde  $Re$  ... Reynoldsovo kritérium,  
 $\nu$  ... kinematická viskozita,  
 $v$  ... průřezová rychlost,  
 $D$  ... průměr potrubí.

Závislost součinitele ztrát třením na Reynoldsově kritériu je proměnná podle typu proudění. Dělí se na oblasti laminárního proudění ( $Re < 2320$ ), turbuletního proudění ( $Re > 13500$ ) a přechodnou oblast. Při měřených průtocích v této práci se vždy jednalo o turbulentní proudění.

Další proměnnou, skrytou v koeficientu ztrát třením, je drsnost. Tu lze popsat několika termíny, avšak samotná teorie drsnosti by si vyžadovala nejspíše vlastní práci. Obecně je definována jako výška výstupků nerovností vnitřního povrchu stěn potrubí. Její hodnota se uvádí obvykle v milimetrech a mohou do ní být zahrnuty i další parametry, jako například deformace ve spojích potrubí, vychylky v osách a podobně.

Materiál	Manning	Hazen-Williams	White-Colebrook		
	n [-]	c [-]	$k_{min}$ [mm]	$k_{str}$ [mm]	$k_{max}$ [mm]
PVC, PE, PP	0,008	150	0,001	0,01	
Sklolaminát	0,008	150	0,001	0,01	
Plastbeton	0,009	145	0,001	0,02	
Azbestocement	0,011	140	0,1	0,4	0,6
Kamenina, nová kvalitní	0,010	130		0,25	
Kamenina - výpočtová hodnota	0,012	125		0,4	
Kamenina, použitá	0,013	100	0,3		1,5
Ocel, bezešvá nová	0,010	140	0,015	0,05	0,09
Ocel, svařovaná nová	0,010	140	0,04		0,1
Ocel, s nátěrem nová	0,010	135	0,05	0,1	0,15
Ocel, použitá vyčištěná	0,011	130	0,15		0,4
Ocel, mírně zrezivělá, lehce inkrustovaná	0,012	120	0,25	0,4	1,0
Ocel, silně inkrustovaná	0,015	85	2	3	>4
Litina, nová s výstelkou	0,010	135	0,1		0,3
Litina, nová bez výstelky	0,011	125	0,15	0,3	0,6
Litina, zrezivělá, lehce inkrustovaná	0,013	110	1		1,5
Litina, silně inkrustovaná	0,015	85	2	3	>4

Obr. 4.3.1 Část tabulky drsností [18]

Dalším jevem, který ovlivňuje drsnost, je stárnutí potrubí. Jedná se o degradaci materiálu v důsledku koroze u kovového potrubí, abraze, nebo inkrustace. Důsledkem tohoto všeho je zavedení pojmu hydraulická drsnost, který zaštiťuje všechny tyto jevy a je tabelován pro jednotlivé materiály. V případě absence potřebné hodnoty se dá drsnost experimentálně změřit nebo odhadnout na základě podobnosti s jiným, známým materiálem. V praktické části jsou hodnoty z Obr. 4.3.1 ze sloupce  $k$ , značeny jako  $\Delta$ .

Pro jednotlivé oblasti proudu, rozdělené podle Reynoldsova kritéria, existují různé empirické vzorce pro výpočet součinitele ztráty třením. Tyto vzorce jsou označovány podle svých autorů, například Haaland, Altšul, Moody, Nikuradse nebo Šifinson, a jejich platnost bývá omezena rozsahem  $Re$ . V této práci byla pro výpočet koeficientu ztrát třením použita rovnice Colebrook-White. Jedná se o implicitní vztah, při jehož řešení je třeba využít numerických metod.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[ \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,71 \cdot D} \right]. \quad (4.3.4)$$

Kde  $\lambda$  ... součinitel ztráty třením,  
 $Re$  ... Reynoldsovo kritérium,  
 $\Delta$  ... hydraulická drsnost,  
 $D$  ... průměr potrubí. [5] [1] [13]

## 4.4 HYDRAULICKY KRÁTKÁ POTRUBÍ

Za hydraulicky krátká potrubí jsou považována potrubí, kde ztráty třením nejsou velmi výrazně větší než ztráty místní, proto se na rozdíl od hydraulicky dlouhých potrubí místní ztráty nezanedbávají. Příkladem jsou hydraulické okruhy podobné okruhu v laboratoři B112. [5] [1] [13]

## 4.5 MOTIVACE A CÍLE PRÁCE

Hlavním úkolem této práce je geometricky zaměřit čerpací stanici hydraulického okruhu a vytvořit pro něj matematický model závislosti průtoku na ztrátách mechanické energie (Q-H charakteristiku), který by byl nápomocen při výběru nových čerpadel v rámci budoucí rekonstrukce. Dalším cílem je odhalit místa, která vnášejí do systému výrazné ztráty energie, a alespoň rámcově navrhnout řešení.

Prvním úkolem je vizuální kontrola trubní sítě hydraulického okruhu. Přesněji možných netěsností nebo korozi poškozených kusů, které by v rámci plánované rekonstrukce bylo třeba vyměnit, sanovat, nebo nahradit jiným kusem.

Druhým krokem je geometrické zaměření a tvorba matematického modelu, který tvoří Q-H charakteristiku trubní sítě.

Následující krok je měření, které by mělo ověřit navržený matematický model. Měřenými veličinami jsou průtok příslušnou měrnou tratí a rozdíl hladin mezi nádrží a měrným žlabem, který navazuje na měrnou trať 1, označený jako statická výška.

V případě neshody měřených hodnot a matematického modelu bude provedena analýza vlivu ztrát na její celkovou velikost a kalibrace modelu.

Konečnou fází této práce bude zhodnocení výsledků a z nich vyplývající návrhy pro budoucí rekonstrukci.

## **5 PRAKTICKÁ ČÁST**

V rámci praktické části této práce budou popsány kroky vedoucí k přípravě na plánovanou rekonstrukci čerpací stanice laboratoře B112.

### **5.1 ZAMĚŘENÍ STÁVAJÍCÍHO STAVU**

Postup zaměření byl postaven na snaze eliminovat jakoukoli chybu, která by mohla vzniknout, a zanést tak nepřesnost do dalších výpočtů. Proto byla každá hodnota měřena třikrát až desetkrát, vždy podle náročnosti úseku, kdy byla subjektivně na místě určena pravděpodobnost vzniku chyby. Dále byla data zkontrolována a poté zprůměrována. Na základě geometrického zaměření dále vznikla výkresová dokumentace čerpací stanice hydraulického okruhu (přílohy 2, 3, 4, 5, 6).

#### **5.1.1 Geometrické zaměření laboratoře**

V průběhu tohoto konkrétního kroku byl základem již jednou zaměřený geometrický podklad, který se bohužel neukázal dostatečně přesný, a proto byl využit jen pro zpětnou kontrolu kompletního zaměření. Pro potřeby práce byl zaměřen přesně jen výklenek v zadní části laboratoře B112, ve kterém se nachází předmětná ČS. Zde byly hodnoty měřeny vícekrát z důvodu zhoršené přístupnosti, a tím i zvýšeného rizika nepřesnosti měření. Pro toto měření byl použit svinovací ocelový metr o délce pěti metrů. Přesnost měření byla s tolerancí na jednotky milimetrů, přičemž tato přesnost vyhovuje nutné přesnosti této úlohy.

#### **5.1.2 Geometrické zaměření ČS hydraulického okruhu**

Pro toto zaměření byl opět využit ocelový svinovací metr o maximální délce pěti metrů. Měřeny byly jednotlivé přímé trubní kusy a toto měření probíhalo zpravidla třikrát. Na většině trubních kusů byla již od výrobce zaznamenána nejen světlost, ale i délka. Výsledky byly porovnány s těmito informacemi a ve všech případech se shodovaly. U trubních kusů, které neměly označení, proběhlo měření opakovaně, avšak jejich parametry nemohly být ověřeny srovnáním parametrů od výrobce. Po změření všech přímých trubních kusů proběhlo měření všech armaturních kusů, kolen a křížení. U těchto trubních kusů, až na čtyři kolena, byly i zde vyraženy výrobcem informace. Jejich srovnáním s měřenými hodnotami byla opět zaznamenána shoda. U čtyř kolen, která nebyla označena, proběhlo důkladné měření, a to jak světlosti, tak délky, ale i poloměru křivosti.

Pro tvorbu výkresu byly využity podklady poskytnuté výrobcem. Jedná se o firmu HAWLE ARMATURY spol. s r.o., která byla v roce 1998 dodavatelem trubního materiálu pro rekonstrukci laboratoře B112.

## 5.2 VIZUÁLNÍ A TECHNICKÉ POSOUZENÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ

Při vizuálním posouzení hydraulického okruhu byla za hlavní cíle určena kontrola netěsností, mechanických poškození nebo jiná funkčnost omezující zjištění. Po pečlivé kontrole však nebyly nalezeny žádné takové nedostatky s výjimkou znečištění vody v jímce jemnozrnným materiálem. Pro provozní a funkční posouzení bylo třeba sestavit Q-H charakteristiku hydraulického okruhu, která zobrazuje závislost velikosti celkových ztrát mechanické energie na průtoku. Pro tento účel byla vybrána měrná trať č. 1 v kombinaci s jednotlivými výtlačnými potrubími a křížením viz kapitulu 2.2 Stávající čerpací stanice a hydraulický okruh laboratoře B112.

Pro potřeby orientace ve výpočtu byl zaveden pojem trasa, který zahrnuje různá výtlačná potrubí a navazující křížení v takové kombinaci, aby koncovou měrnou tratí byla vždy měrná trať 1. Dále byl zaveden pojem úsek, který zaštiťuje jednotlivé přímé kusy, nebo singularity. Proto v záhlaví výpočetní tabulky je číslo úseku, tedy pořadí daného trubního kusu, a v závorce je uvedeno, o jakou singularity, nebo přímý kus se přesně jedná.

Pro tvorbu matematického modelu byly dohledány jednotlivé ztrátové součinitele u výrobce [12], nebo odhadnuty na základě podobnosti. Pro křížové kusy a T-kusy (jejich ztrátové součinitele) byl využit zdroj [12]. Absolutní hodnota drsnosti všech potrubí byla dle [18] ve všech výpočtech uvažována 0,4 mm. Jednotlivé ve výpočtech použité hodnoty součinitele místní ztráty jsou v tabulce Tabulka 5.2.1.

Tabulka 5.2.1 Hodnoty součinitelů místní ztráty

singularita	DN	$\zeta$
koleno	65	0,15
koleno	125	0,17
koleno	200	0,17
zpětná k.	65	1,07
zpětná k.	125	1,13
difuzor	100	0,08
difuzor	200	0,17
šoupě	65	0,05
šoupě	200	0,05
křížení (0°)	200	0,05
křížení (90°)	200	1,30
T- kus	200	1,30
průtokoměr	200	0,01



Výpočet ztrát probíhal sumací jejich velikostí v jednotlivých úsecích a pro jednotlivé průtoky. Pro každou variantu byla vytvořena soustava tabulek v programu Excel, ve kterých byla vždy pro konkrétní přímý trubní kus, nebo singularitu (úsek), dopočítána ztráta pro jednotlivé průtoky. V tomto případě nebyla započítávána statická výška (rozdíl hladiny v nádrži a v měrném žlabu), proto Q-H charakteristiky jednotlivých tras mají počátek v nule.

**Tabulka 5.2.2 Výpočet místní ztráty na prvním úseku první trasy**

úsek 1 (koleno)				
N	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$v [m/s]$	$H_{zm} [m]$
$Q_1$	0,0	0,0000	0,000	0,00
$Q_2$	0,2	0,0002	0,060	0,00
$Q_3$	0,5	0,0005	0,151	0,00
$Q_4$	1,0	0,0010	0,301	0,00
$Q_5$	1,5	0,0015	0,452	0,00
$Q_6$	2,0	0,0020	0,603	0,00
$Q_7$	3,5	0,0035	1,055	0,01
$Q_8$	5,0	0,0050	1,507	0,02
$Q_9$	6,0	0,0060	1,808	0,03
$Q_{10}$	7,0	0,0070	2,110	0,03
$Q_{11}$	10,0	0,0100	3,014	0,07
$Q_{12}$	13,0	0,0130	3,918	0,12
$Q_{13}$	15,0	0,0150	4,520	0,16
$Q_{14}$	18,0	0,0180	5,424	0,23
$Q_{15}$	20,0	0,0200	6,027	0,28

Pro jednotlivé průtoky ( $Q$ ) byla dopočítána průřezová rychlost ( $v$ ) a pro singularity dopočítána místní ztráta energie (Tabulka 5.2.2). Pro přímé kusy bylo třeba spočítat Reynoldsovo kritérium a dále pak iterovat součinitel ztráty třením ( $\lambda$ ). Tato iterace probíhala podle Colebrook-Whiteovy rovnice. Posledním krokem bylo dopočítání ztráty třením po délce pro daný úsek (Tabulka 5.2.3).

**Tabulka 5.2.3 Výpočet ztráty třením na třetím úseku první trasy**

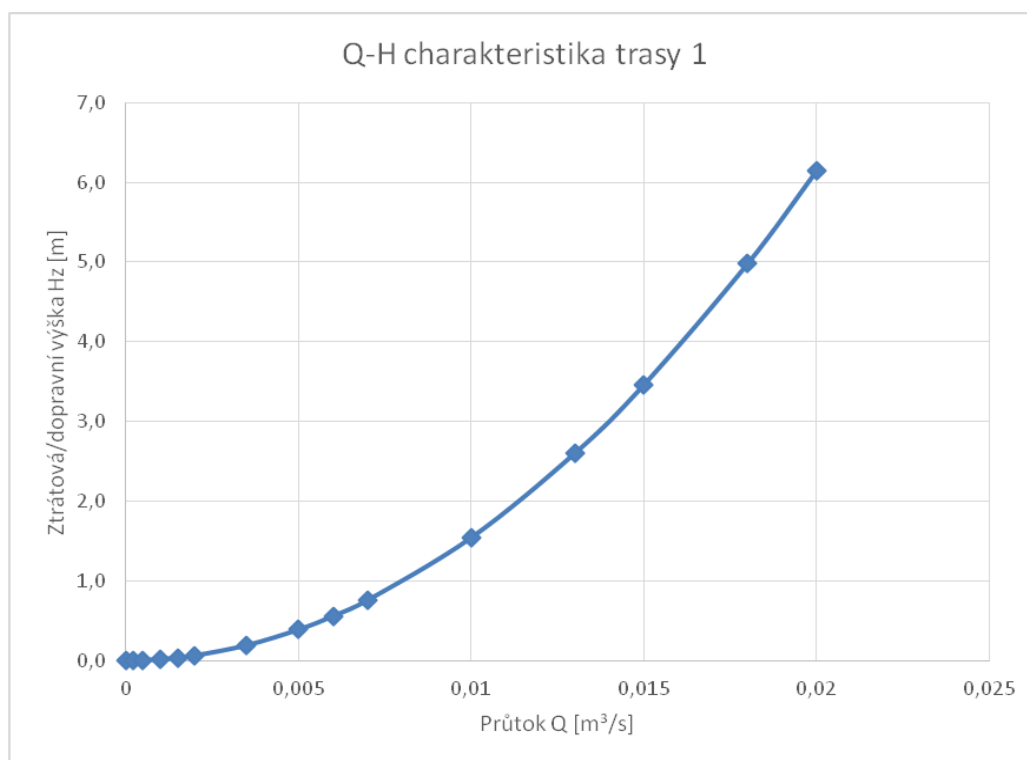
úsek 3 (přímý kus)										
N	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$v [m/s]$	$Re$	$\lambda_0$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$H_{zt} [m]$
$Q_1$	0,0	0,0000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,00
$Q_2$	0,2	0,0002	0,060	2991	0,01	0,0627	0,0473	0,0490	0,0488	0,00
$Q_3$	0,5	0,0005	0,151	7476	0,01	0,0473	0,0402	0,0408	0,0407	0,00
$Q_4$	1,0	0,0010	0,301	14953	0,01	0,0408	0,0369	0,0371	0,0371	0,00
$Q_5$	1,5	0,0015	0,452	22429	0,01	0,0383	0,0356	0,0357	0,0357	0,01
$Q_6$	2,0	0,0020	0,603	29906	0,01	0,0369	0,0349	0,0349	0,0349	0,02
$Q_7$	3,5	0,0035	1,055	52335	0,01	0,0351	0,0339	0,0339	0,0339	0,04
$Q_8$	5,0	0,0050	1,507	74765	0,01	0,0343	0,0334	0,0335	0,0335	0,09
$Q_9$	6,0	0,0060	1,808	89717	0,01	0,0340	0,0333	0,0333	0,0333	0,13
$Q_{10}$	7,0	0,0070	2,110	104670	0,01	0,0338	0,0331	0,0332	0,0332	0,17
$Q_{11}$	10,0	0,0100	3,014	149529	0,01	0,0334	0,0329	0,0329	0,0329	0,35
$Q_{12}$	13,0	0,0130	3,918	194388	0,01	0,0331	0,0328	0,0328	0,0328	0,59
$Q_{13}$	15,0	0,0150	4,520	224294	0,01	0,0330	0,0327	0,0327	0,0327	0,78
$Q_{14}$	18,0	0,0180	5,424	269152	0,01	0,0329	0,0327	0,0327	0,0327	1,13
$Q_{15}$	20,0	0,0200	6,027	299058	0,01	0,0329	0,0326	0,0327	0,0327	1,40

Tabulka 5.2.2 a Tabulka 5.2.3 jsou jen ukázkou způsobu výpočtu. Kompletní výpočty pro všechny čtyři trasy jsou v příloze 1 Hydrotechnické výpočty.

Dále pak byla vytvořena sumační tabulka zahrnující součet výsledných ztrát při daných průtocích. Z ní byl vytvořen graf Q-H charakteristiky předmětné trasy. Toto bylo vytvořeno pro všechny čtyři varianty tras (strany 43, 44, 45 a 46).

**Tabulka 5.2.4 Sumační tabulka ztrát pro první trasu**

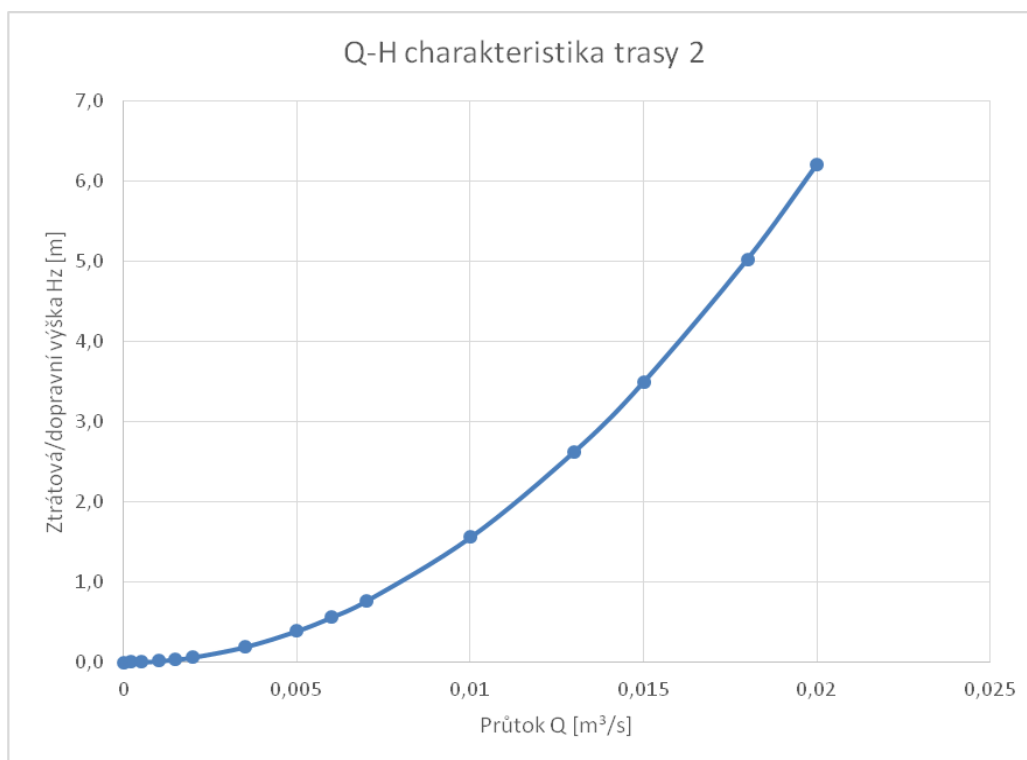
Q-H charakteristika Trasy 1			
N	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_z [m]$
$Q_1$	0,0	0	0,00
$Q_2$	0,2	0,0002	0,00
$Q_3$	0,5	0,0005	0,01
$Q_4$	1,0	0,0010	0,02
$Q_5$	1,5	0,0015	0,04
$Q_6$	2,0	0,0020	0,06
$Q_7$	3,5	0,0035	0,19
$Q_8$	5,0	0,0050	0,39
$Q_9$	6,0	0,0060	0,56
$Q_{10}$	7,0	0,0070	0,76
$Q_{11}$	10,0	0,0100	1,54
$Q_{12}$	13,0	0,0130	2,60
$Q_{13}$	15,0	0,0150	3,46
$Q_{14}$	18,0	0,0180	4,98
$Q_{15}$	20,0	0,0200	6,15



**Graf 5.2.1 Q-H charakteristika první trasy**

**Tabulka 5.2.5 Sumační tabulka ztrát pro druhou trasu**

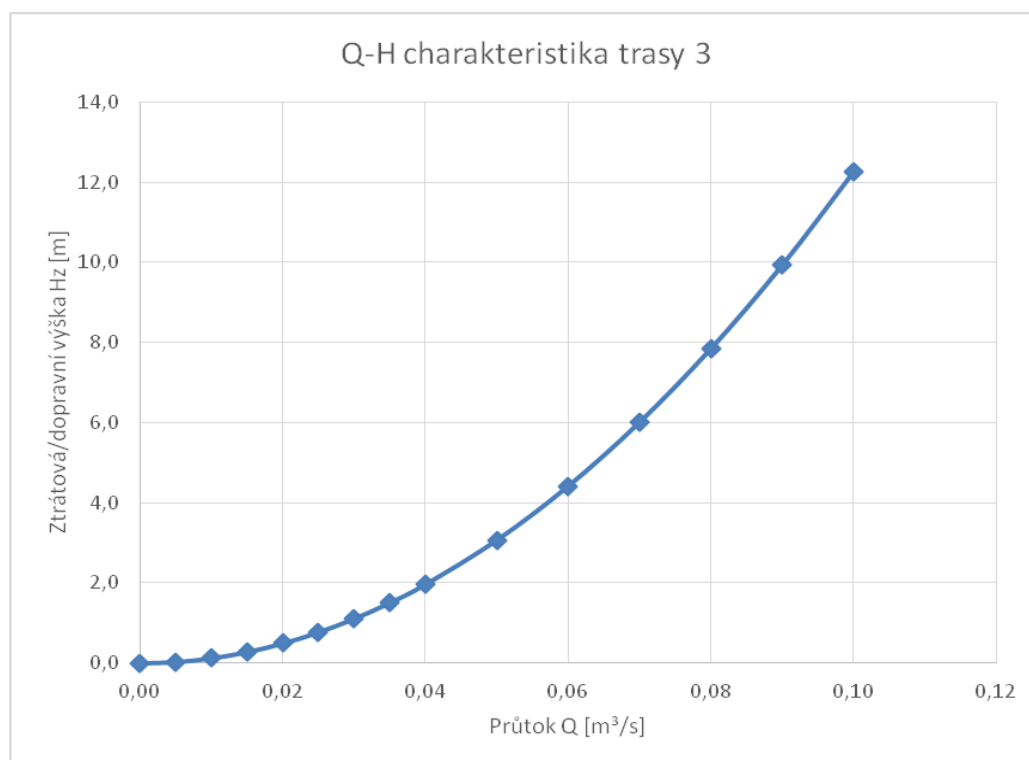
Q-H charakteristika Trasy 2			
N	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_z [m]$
$Q_1$	0,0	0,0000	0,00
$Q_2$	0,2	0,0002	0,00
$Q_3$	0,5	0,0005	0,01
$Q_4$	1,0	0,0010	0,02
$Q_5$	1,5	0,0015	0,04
$Q_6$	2,0	0,0020	0,06
$Q_7$	3,5	0,0035	0,19
$Q_8$	5,0	0,0050	0,39
$Q_9$	6,0	0,0060	0,56
$Q_{10}$	7,0	0,0070	0,77
$Q_{11}$	10,0	0,0100	1,56
$Q_{12}$	13,0	0,0130	2,62
$Q_{13}$	15,0	0,0150	3,49
$Q_{14}$	18,0	0,0180	5,02
$Q_{15}$	20,0	0,0200	6,20



**Graf 5.2.2 Q-H charakteristika druhé trasy**

**Tabulka 5.2.6** Sumační tabulka ztrát pro třetí trasu

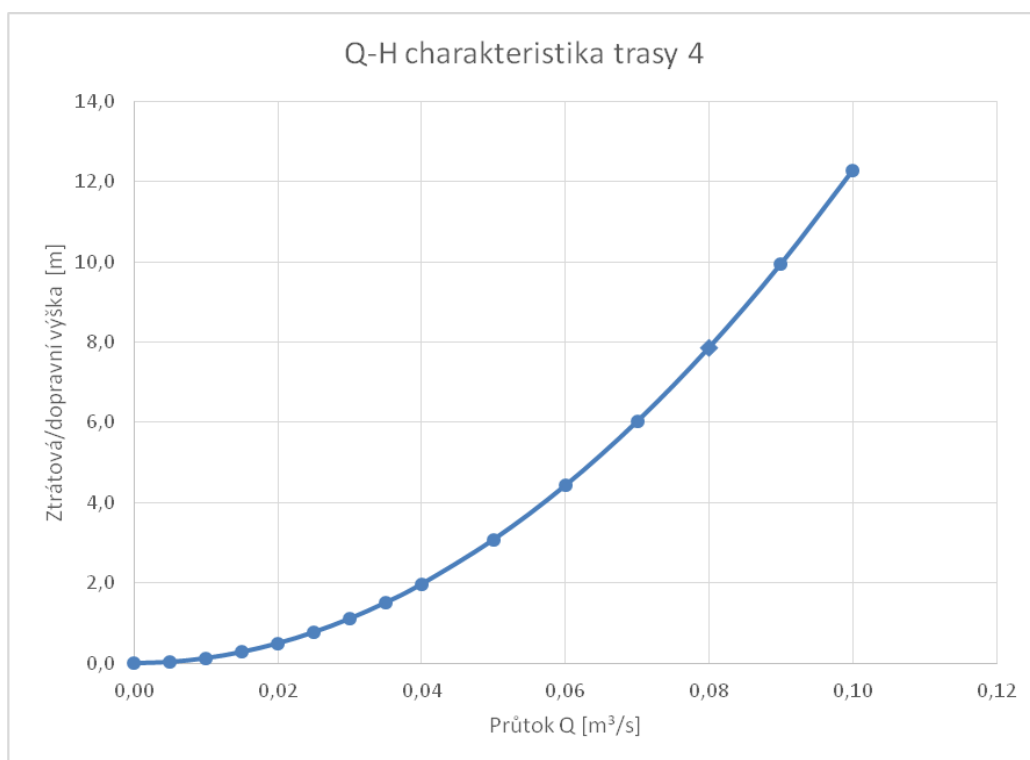
Q-H charakteristika Trasy 3			
N	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_z [m]$
$Q_1$	0	0,0000	0,00
$Q_2$	5	0,0050	0,03
$Q_3$	10	0,0100	0,12
$Q_4$	15	0,0150	0,28
$Q_5$	20	0,0200	0,49
$Q_6$	25	0,0250	0,77
$Q_7$	30	0,0300	1,11
$Q_8$	35	0,0350	1,51
$Q_9$	40	0,0400	1,97
$Q_{10}$	50	0,0500	3,07
$Q_{11}$	60	0,0600	4,42
$Q_{12}$	70	0,0700	6,01
$Q_{13}$	80	0,0800	7,84
$Q_{14}$	90	0,0900	9,92
$Q_{15}$	100	0,1000	12,25



**Graf 5.2.3** Q-H charakteristika třetí trasy

**Tabulka 5.2.7 Sumační tabulka ztrát pro čtvrtou trasu**

Q-H charakteristika Trasy 4			
N	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_z [m]$
$Q_1$	0	0,0000	0,00
$Q_2$	5	0,0050	0,03
$Q_3$	10	0,0100	0,12
$Q_4$	15	0,0150	0,28
$Q_5$	20	0,0200	0,49
$Q_6$	25	0,0250	0,77
$Q_7$	30	0,0300	1,11
$Q_8$	35	0,0350	1,51
$Q_9$	40	0,0400	1,97
$Q_{10}$	50	0,0500	3,07
$Q_{11}$	60	0,0600	4,42
$Q_{12}$	70	0,0700	6,02
$Q_{13}$	80	0,0800	7,86
$Q_{14}$	90	0,0900	9,95
$Q_{15}$	100	0,1000	12,28



**Graf 5.2.4 Q-H charakteristika čtvrté trasy**

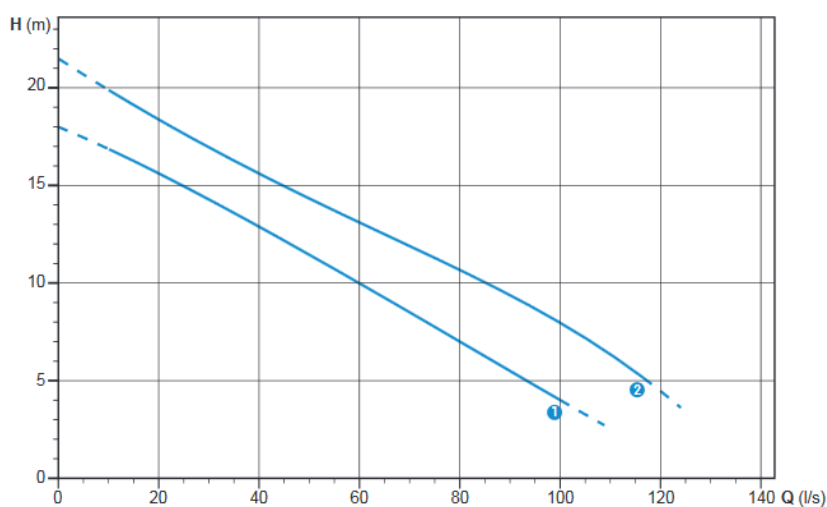
Štítky čerpadel byly v průběhu práce sejmuty a vyčištěny. Pro jednotlivá čerpadla byly dohledány charakteristiky podle těchto štítků z katalogu firmy Zenit. Jedná se o jednostupňová, radiální, hydrodynamická čerpadla, vyrobená v roce 1999. Jsou určena pro umístění do mokré jímky.



Obr. 5.2.1 Štítek čerpadla (první pár viz kap. 2.2.1, autor: Ing. M. Žoužela, Ph.D.)

#### Performances

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
l/s	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000	6600
l/min	0	36	72	108	144	180	216	252	288	324	360	396
m³/h	0	3.6	7.2	10.8	14.4	18.0	21.6	25.2	28.8	32.4	36.0	39.6
1 DRP 1500/4/125 A0IT5	18.0	16.9	15.6	14.3	13.0	11.5	10.0	8.4	7.0	5.5	3.8	
2 DRP 2000/4/125 A0IT5	21.5	19.8	18.4	17.0	15.6	14.3	13.0	11.9	10.6	9.3	7.9	6.1



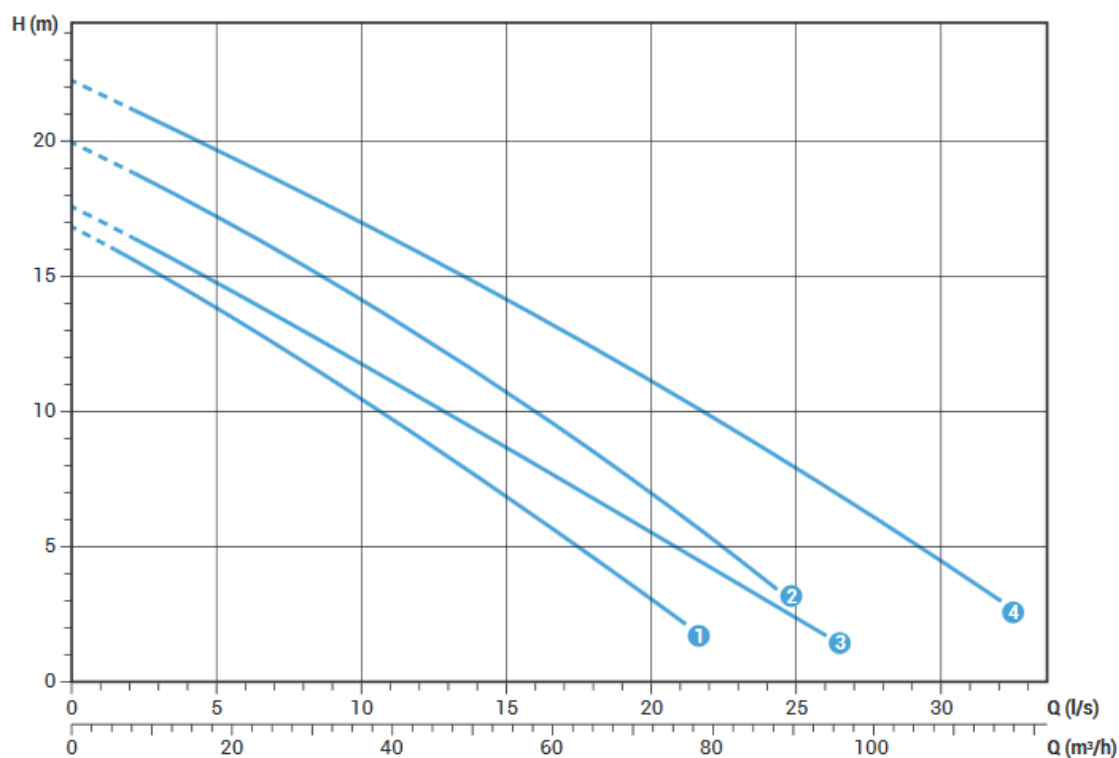
Obr. 5.2.2 Charakteristiky prvního páru čerpadel [6]



Obr. 5.2.3 Štitok čerpadla (druhý pár viz kap. 2.2.1, autor: Ing. M. Žoužela, Ph.D.)

### Performances

	l/s	0	4	8	12	16	20	24	28	32
	l/min	0	240	480	720	960	1200	1440	1680	1920
	m³/h	0	14.4	28.8	43.2	57.6	72	86.4	100.8	115.2
① DRN 250/2/65 A1DM(T)5		16.8	14.4	11.9	9.1	6.1	3.1			
② DRN 300/2/65 A1DT5		20.0	17.8	15.4	12.8	9.9	6.8	3.7		
③ DRN 400/2/65 A1FT5		17.5	15.3	13.0	10.5	8.0	5.5	3.0		
④ DRN 550/2/65 A1FT5		22.2	20.1	18.0	15.9	13.6	11.2	8.6	5.9	3.0



Obr. 5.2.4 Charakteristiky druhého páru čerpadel [6]



## 5.3 POSOUZENÍ KAPACITY ČERPACÍ STANICE

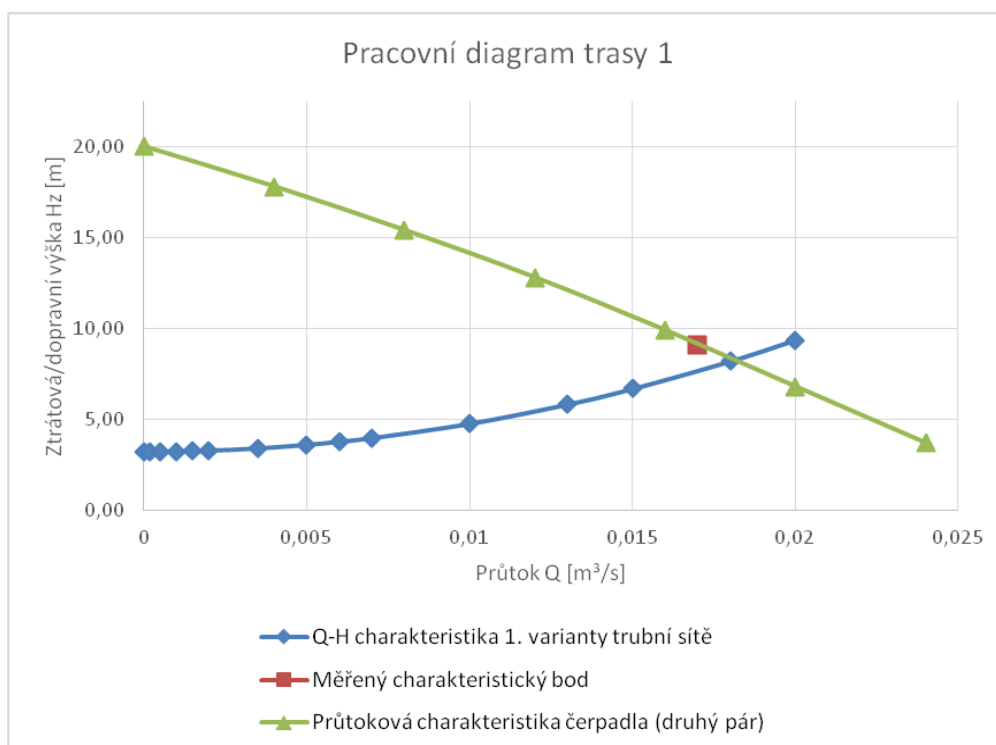
Pro posouzení kapacity čerpací stanice byly naměřeny charakteristické body čerpadel na hydraulickém okruhu a porovnány s charakteristikami od výrobce. Měřeny byly průtok (průtokoměrem) a statická výška (metrem). Statická výška představuje rozdíl vzdálenosti mezi hladinou v sací jímce a v měrném žlabu. Dopravní výška se sestává ze součtu výšky statické a ztrátové pro daný průtok. Pro první měření byla vybrána trasa 1 (viz přílohy 2, 3, 4 a 7). Měřený charakteristický bod odpovídá čerpadlu, na schématu označenému jako Č1.

Tabulka 5.3.1 Měřený charakteristický bod 1

Měřený charakteristický bod 1			
$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_{statická} [m]$	$H_{dopr} [m]$
17	0,017	3,165	9,07

Stejně jako pro první bod byl charakteristický bod měřený i pro další tři trasy. Následně byla vyhodnocena dopravní výška jako součet statické výšky (tedy rozdílu hladin mezi jímkou a koncovým měrným žlabem) a ztrátové výšky, dané charakteristikou trubní sítě příslušné trasy.

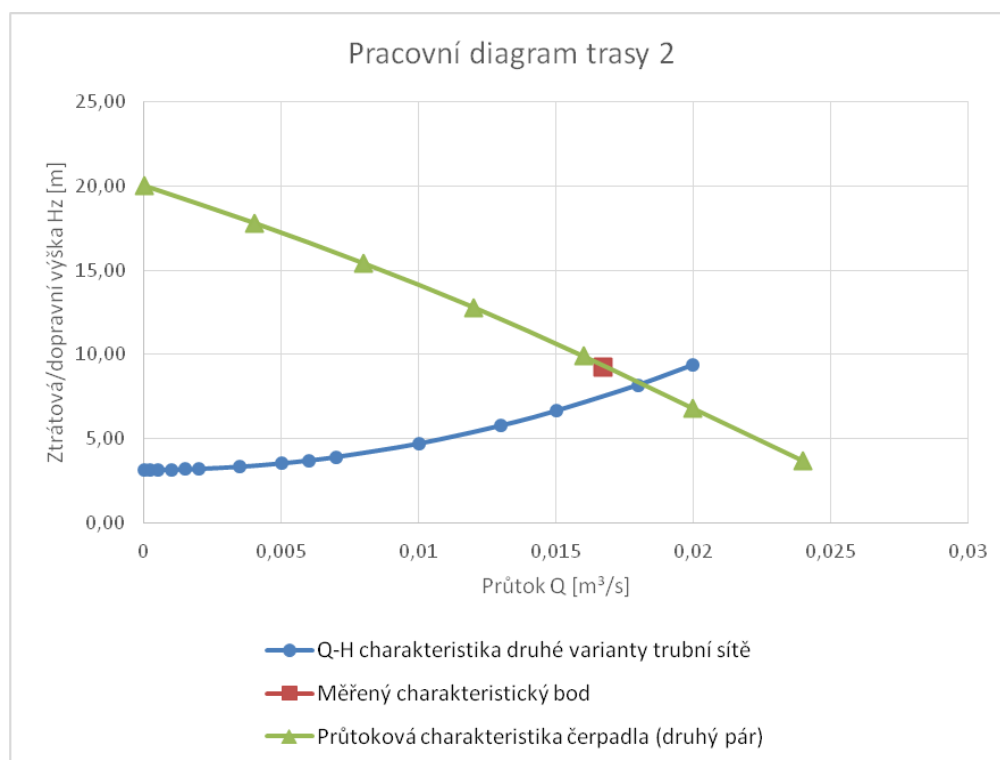
Výsledný graf je kombinací Q-H charakteristiky dané trasy a příslušného čerpadla, do nějž byl vložen měřený charakteristický bod. Pro Q-H charakteristiky v tomto případě již byla započítána statická výška.



Graf 5.3.1 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 1. trasa

**Tabulka 5.3.2 Měřený charakteristický bod 2**

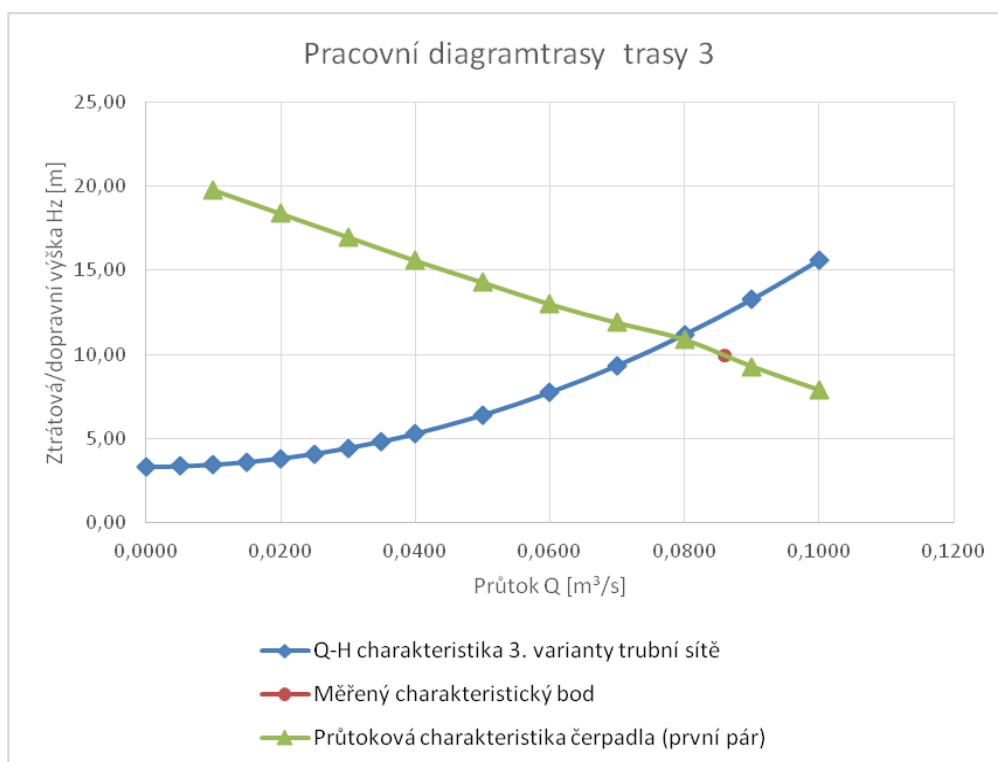
Měřený charakteristický bod 2			
$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_{statická} [m]$	$H_{dopr} [m]$
16,7	0,0167	3,165	9,26



**Graf 5.3.2 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 2. trasa**

**Tabulka 5.3.3 Měření charakteristický bod 3**

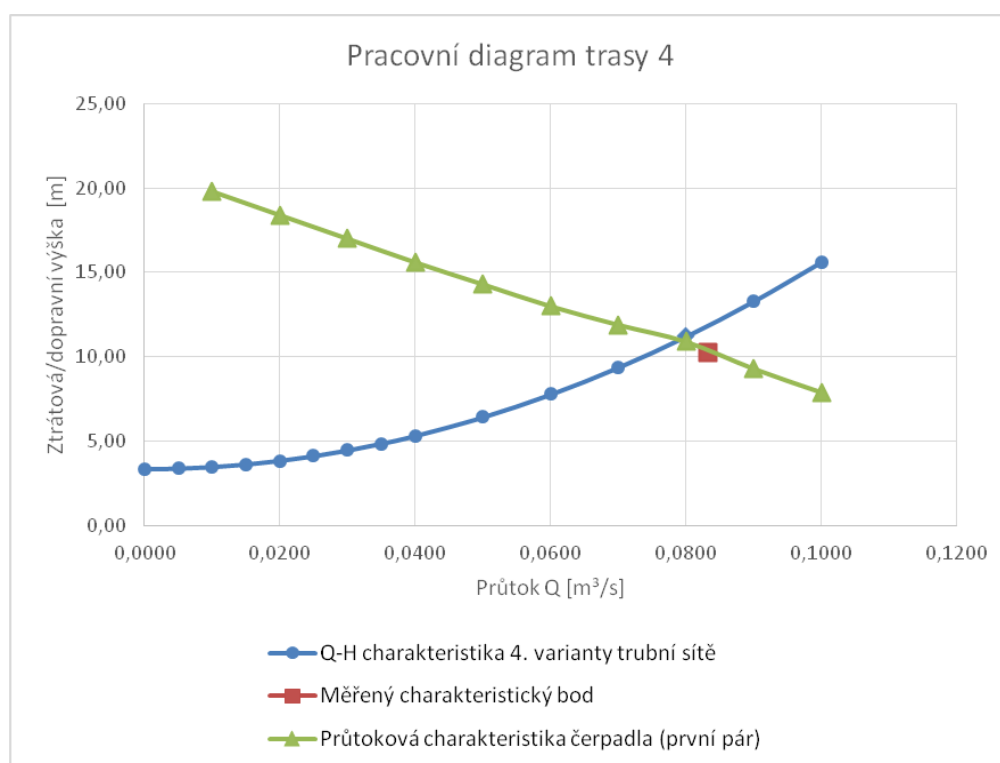
Měření charakteristický bod 3			
$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_{statická} [m]$	$H_{dopr} [m]$
86	0,086	3,35	9,94



**Graf 5.3.3 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 3. trasy**

**Tabulka 5.3.4 Měření charakteristický bod 4**

Měření charakteristický bod 4			
$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$H_{statická} [m]$	$H_{dopr} [m]$
83,2	0,0832	3,35	10,27



**Graf 5.3.4 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 4. trasa**

## 5.4 SHRnutí ZÁVĚRŮ

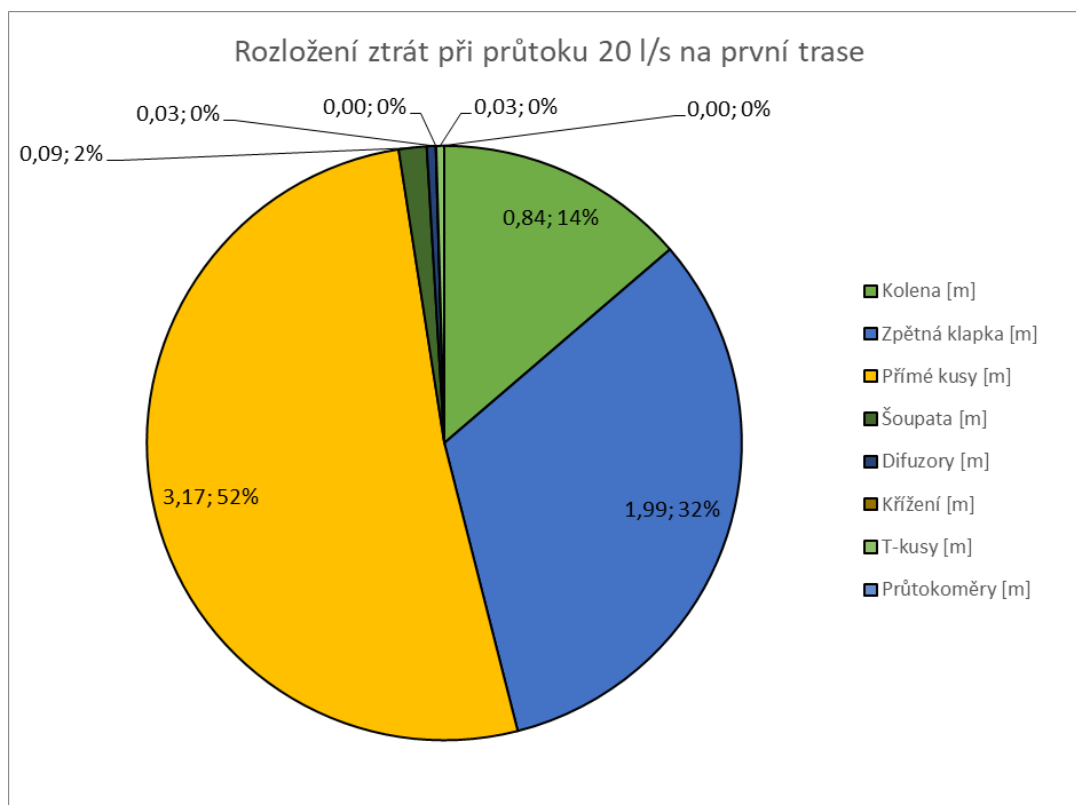
Z naměřených charakteristických hodnot plyne, že numerický model pro výpočet Q-H charakteristik jednotlivých variant trubní sítě je relativně přesný. Velmi dobrého výsledku bylo dosaženo především u tras 3 a 4, naopak u tras 1 a 2 je výsledek mírně odlišný. Ideální charakteristický bod by se nacházel v průsečíku charakteristiky čerpadla a matematickým modelem vypočtené Q-H charakteristiky sítě. Posun průsečíku mimo tento ideální bod především u trasy 1 a 2 je pravděpodobně způsoben kombinací několika příčin.

- Prvním zásadním faktorem, který mohl ovlivnit výsledek, je hodnota drsnosti trubního materiálu. Drsnost potrubí byla pro celý výpočtový model brána jako jednotná hodnota, což ve skutečnosti nemusí platit, především pro část výtlačků, kde je výrazný rozdíl mezi oběma páry výtlačných potrubí v dimenzi i výrobci trubního materiálu.
- Druhým výrazným faktorem je volba součinitele místní ztráty (především pro zpětné klapky) a fakt, že jednotlivé singularity na sebe navazují a vzájemně se ovlivňují.
- Je třeba uvažovat i s chybou měření průtoku indukčním průtokoměrem, která se může ohybovat okolo 1,5 %.
- Stáří čerpadel je značné a při dohledávání charakteristik se ukázalo, že není dostupná přesná průtoková charakteristika daného modelu, ale modelu, který je mladší. Tento problém však postihuje pouze čerpadla v druhém páru (čerpadla 1 a 2, tedy malá). Jejich námi zobrazená charakteristika, především v oblasti nižších průtoků, vykazuje mírné odklonění od hodnot uvedených na štítku.

Pro ověření těchto teorií byla provedena analýza vlivu dílčích ztrát na její celkovou hodnotu, založená na porovnání procentuálního zastoupení jednotlivých ztrát mechanické energie na příslušných singularitách a po délce jednotlivých přímých úseků měrných tratí.

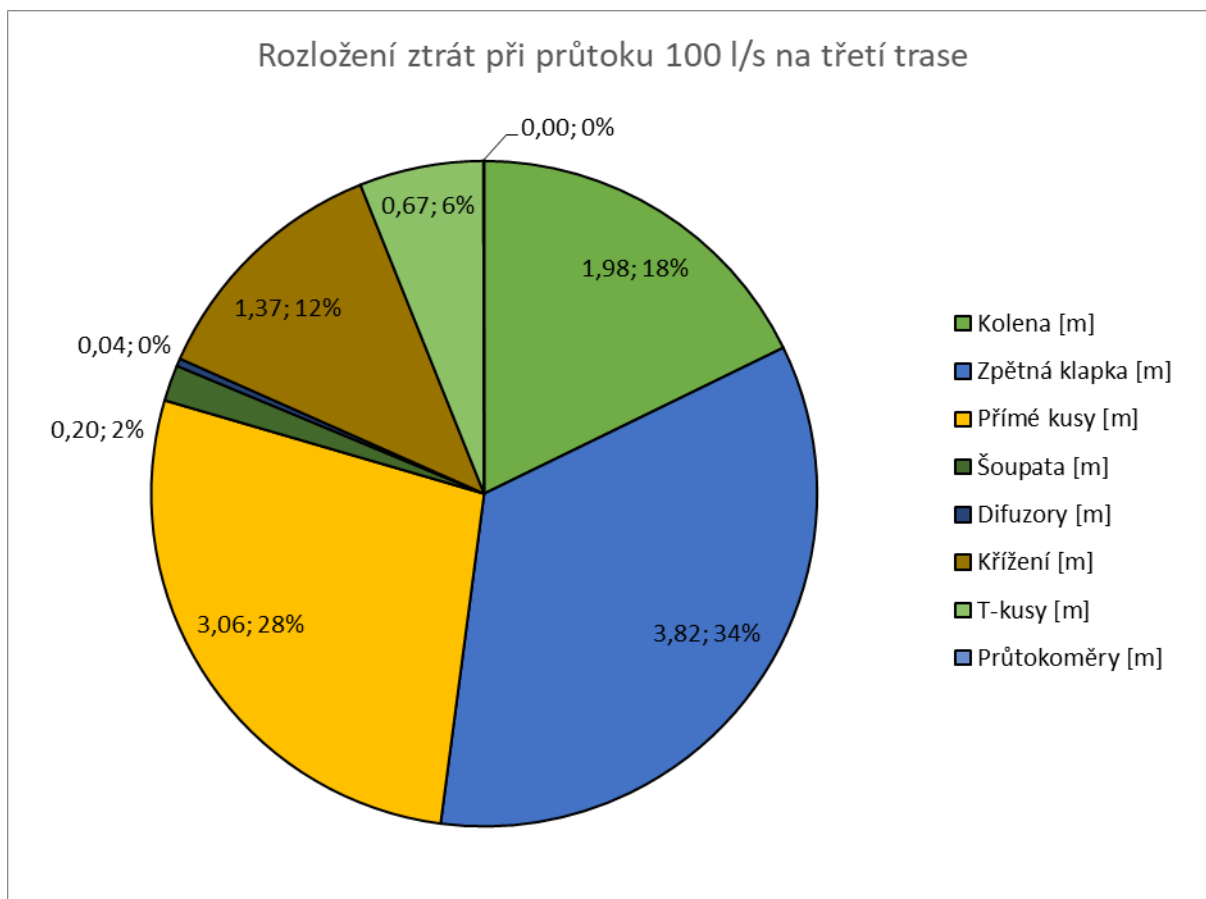
## 5.5 ANALÝZA VLIVU DÍLČÍCH ZTRÁT NA JEJÍ CELKOVOU HODNOTU

V rámci této analýzy byly hodnoceny trasy 1 a 3. Důvodem je rozdíl mezi první a druhou trasou, který spočívá pouze v jednom kusu křížení. Tento kus, jak vyplývá z grafu, nehraje významnou roli v oblasti ztrát. Podobně je na tom rozdíl mezi třetí a čtvrtou trasou.



Graf 5.5.1 Analýza ztrát energie první trasy

Z grafu je zřejmé, že úvaha uvedená v kapitole 5.4 o možném zdroji nepřesností nebyla daleko od pravdy. U této trasy je nutno dodat, že ztráta energie při průtoku  $20 \text{ l.s}^{-1}$  na úsecích 3 a 5, tedy na přímých kusech výtlačného potrubí, činí 1,40 m a 1,76 m, což představuje 99 % celkové ztráty na přímých kusech. Dalším významným zdrojem ztráty energie je dle předpokladu zpětná klapka, která, jako jediná singularita, způsobuje téměř třetinovou ztrátu systému.



Graf 5.5.2 Analýza ztrát energie třetí trasy

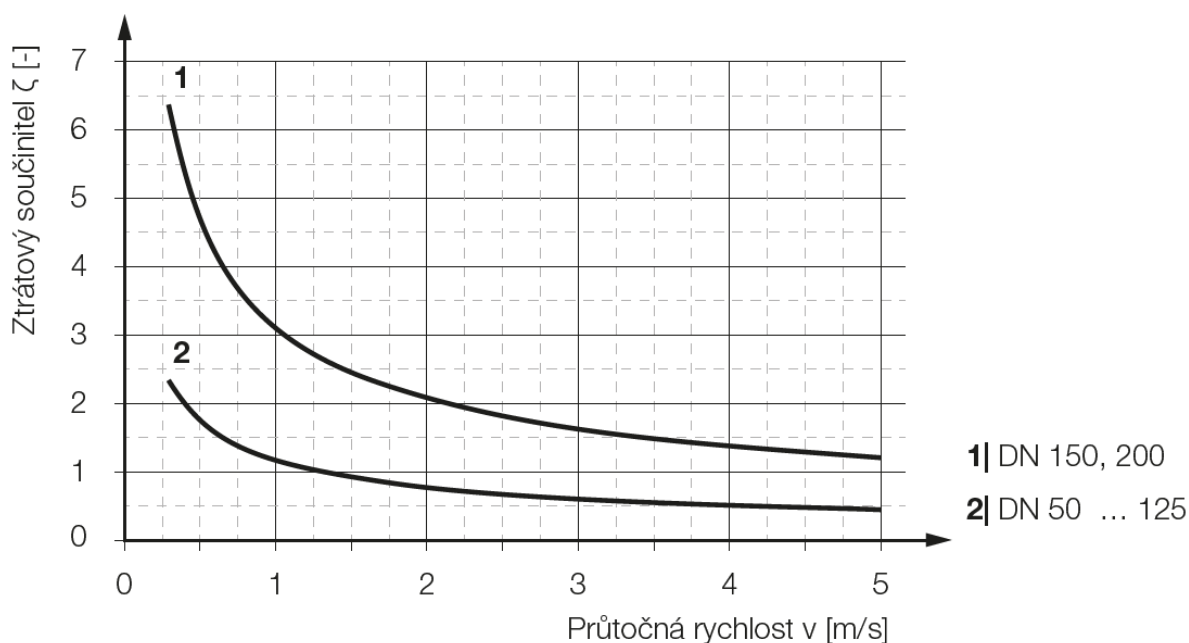
Z grafu rozložení ztrát energie pro třetí trasu vyplývá, že největší vliv na celkovou ztrátu má právě zpětná klapka společně s přímými úseky potrubí.

## 5.6 KALIBRACE MATEMATICKÉHO MODELU

Na základě provedené analýzy, viz kapitulu 5.5, byly určeny dvě oblasti, které nejvíce ovlivňují celkovou ztrátu. A to konkrétně přímé kusy a zpětné klapky. V rámci kalibrace matematického modelu byl měněn součinitel místní ztráty  $\zeta$  a hodnota drsnosti  $\Delta$ . Cílem kalibrace je docílit posunu Q-H charakteristiky tak, aby průsečík charakteristiky čerpadla a trubní sítě ležel na měřeném charakteristickém bodě.

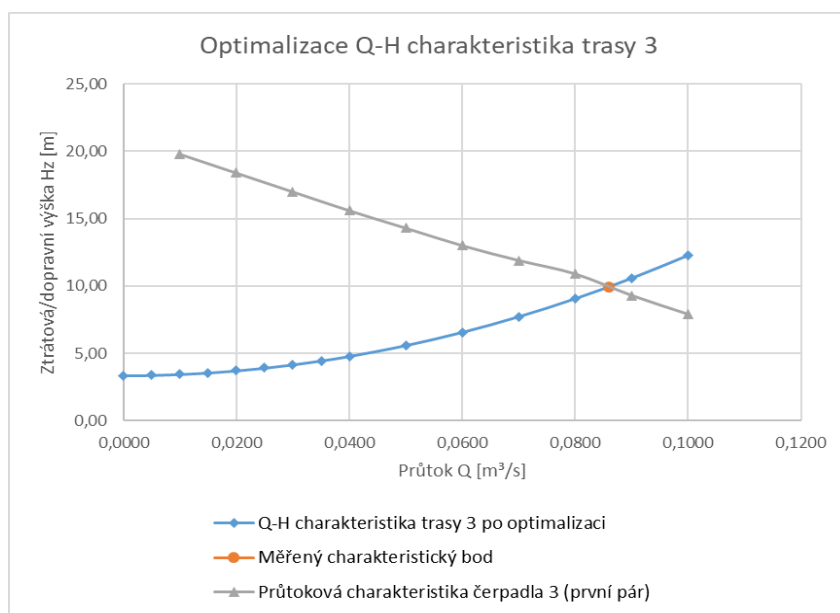
### 5.6.1 Optimalizace ztrátového součinitele zpětných klapek třetí trasy

V tomto kroku byl změněn pouze součinitel místní ztráty  $\zeta$  pro zpětnou klapku, a to z hodnoty 1,13 na hodnotu 0,5 dle katalogu jiného výrobce zpětné klapky [19]. Hodnota drsnosti trubních úseků v tomto případě nebyla měněna. Původní hodnota byla určena dle katalogu firmy HAWLE [12].



Obr. 5.6.1.1 Diagram závislosti ztrátového součinitele na průřezové rychlosti [19]



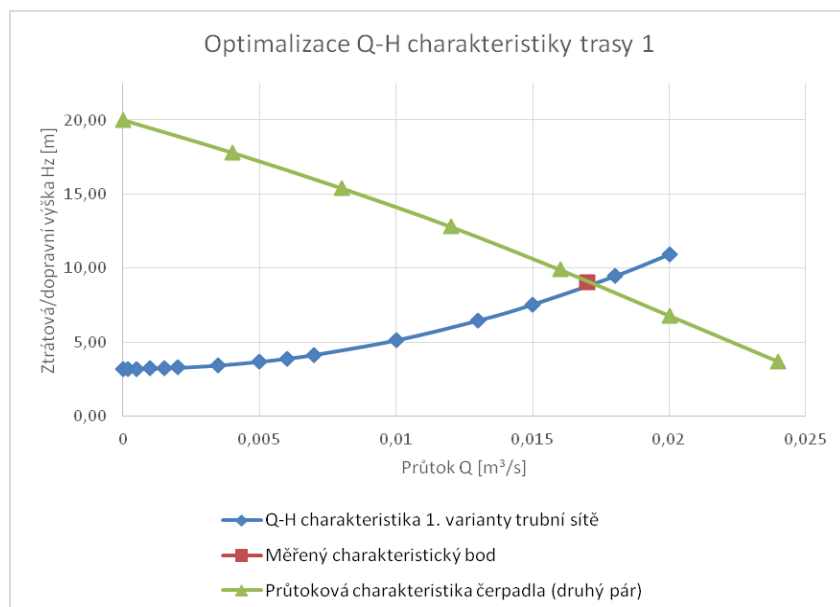


**Graf 5.6.1.1 Výsledný graf po kalibraci ztrátového součinitele pro zpětnou klapku třetí trasy**

Snížení hodnoty součinitele místní ztráty pro klapku, které vedlo k dostatečnému snížení celkové ztráty, bylo na 44% původní hodnoty.

## 5.6.2 Optimalizace drsnosti pro výtlačná potrubí první trasy

V rámci této optimalizace byla změněna pouze drsnost pro výtlačná potrubí první trasy. Pro dosažení cíle bylo třeba změnit hodnotu drsnosti z 0,4 mm na 1,3 mm. Součinitel místní ztráty zůstal nezměněn (1,07)



**Graf 5.6.2.1 Výsledný graf po kalibraci hodnoty drsnosti výtlačných potrubí první trasy**

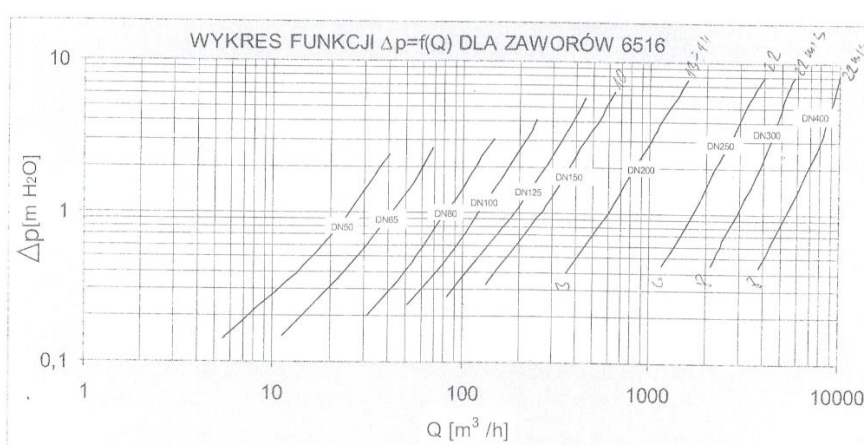
Při této optimalizaci bylo třeba navýšit hodnotu drsnosti o 225 %. Uvedená hodnota odpovídá litině, zrezlé a lehce inkrustované, dle [18].

### 5.6.3 Kombinovaná optimalizace

Kombinovanou optimalizací je myšlen postup, kdy jsou měněny oba parametry, které dle předchozích analýz nejvíce ovlivňují výslednou celkovou ztrátu mechanické energie.

#### *První trasa*

Pro potřeby optimalizace bylo třeba dohledat výrobce zpětných klapek. Jedná se o polskou firmu Fabryka Armatur JAFAR S.A. Z grafu závislosti změny tlaku na průtoku byla nejdříve dopočítána přesná ztráta a poté měněna drsnost tak, aby měřený bod ležel přesně v průsečíku charakteristik čerpadla a sítě.



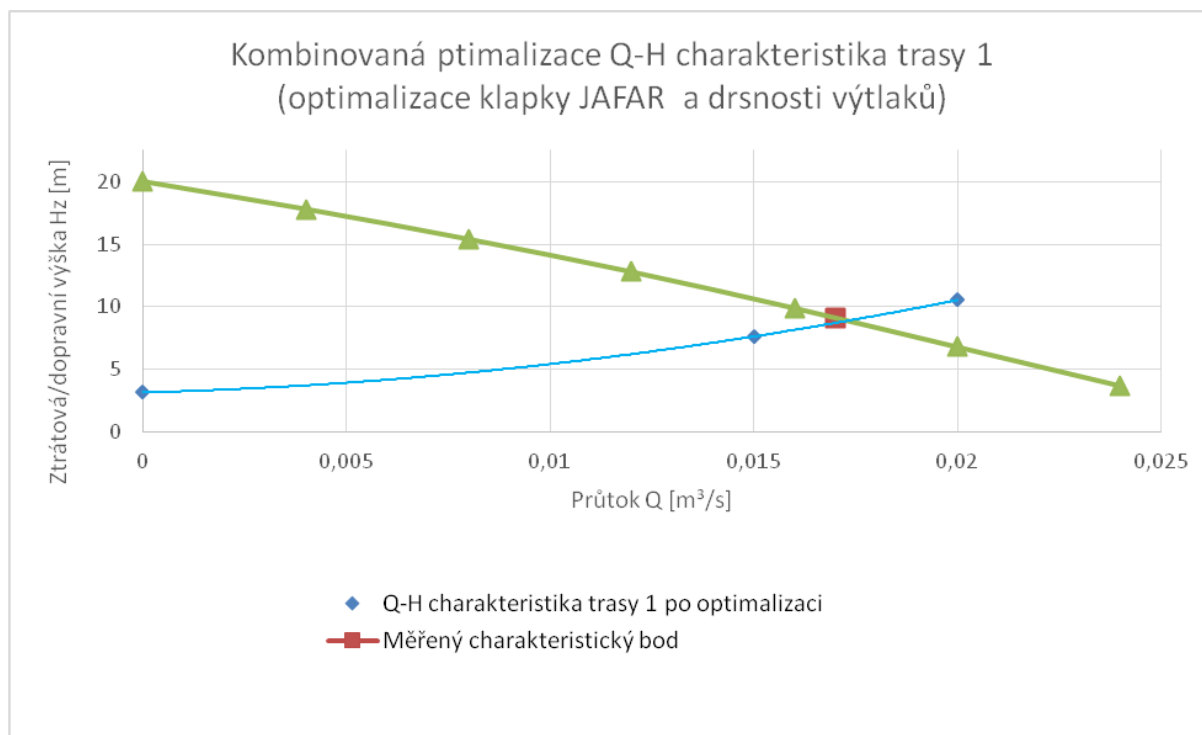
Obr. 5.6.3.1 Graf závislosti změny tlaku na průtoku singularitou [18]

Protože graf neudává změnu součinitele pro místní ztrátu, ale jen změnu tlaku, byly odečteny tři hodnoty ( $H_z$ ), ze kterých byla sestrojena polynomičká funkce.

Tabulka 5.6.3.1 Sumační tabulka ztrát pro trasu 1 po optimalizaci klapky a drsnosti

Q-H charakteristika Trasy 1 (optimalizace klapky JAFAR a drsnosti výtlačů)				
N	$Q$ [l/s]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$H_z$ [m]	$H_{dopr}$
$Q_1$	0,0	0,0000	0,0000	3,17
$Q_{13}$	15,0	0,0150	4,4708	7,64
$Q_{15}$	20,0	0,0200	7,3847	10,55

Dále byla změněna hodnota drsnosti z 0,4 mm na 0,5 mm. To činí nárůst o 25%.



**Graf 5.6.3.1 Kombinovaná optimalizace trasy 1**

Touto optimalizací nedošlo k tak výraznému navýšení drsnosti, jako u optimalizace v kapitole 5.6.2.

### ***Třetí trasa***

Podobně jako pro první trasu i zde se jedná o zpětné klapky JAFAR. Cílem optimalizace třetí trasy však je snížit celkovou ztrátu mechanické energie. Z hodnot na Obr. 5.6.3.1 však vyplývá, že by se ztráta (oproti hodnotám dle [12]) navyšovala. Proto pro tuto trasu nebyla zavedena další optimalizace. Důvodem je nejspíše to, že k této zpětné klapce náleží jiná charakteristika.

## **5.7 SHRNU TÍ ZÁVĚRŮ OPTIMALIZACÍ**

Pomocí dvou různých optimalizací bylo dosaženo shody průniků charakteristik sítě a čerpadel s měřeným charakteristickým bodem. Optimalizace pro první trasu byla následně upravena na základě nových poznatků o charakteristikách zpětné klapky. Dá se tedy předpokládat, že tento model je již dostatečně přesný. Jednotlivé optimalizace byly voleny tak, aby se vzájemně neovlivnily. Proto je jejich zavedení do celkového matematického modelu jednoduché a neovlivní ostatní výsledky.

## **5.8 DOPORUČENÍ PRO BUDOUCÍ REKONSTRUKCI**

Z kapitol 5.4 a 5.6.2 mimo jiné vyplývá, že výtlačná potrubí na trasách 1 a 2 zřejmě mohou mít vyšší drsnost než zbylá trubní síť. Při rekonstrukci by bylo vhodné tuto domněnku zkontrolovat a v případě nutnosti opravit nebo vyčistit vnitřní stranu potrubí.

Pro celkové zvýšení kapacity by však bylo výrazně výhodnější, celou výtlačnou část tras 1 a 2 vyměnit za vyšší dimenzi, což by vedlo k výraznému snížení ztrát energie (v rámci desítek procent). Podobně by bylo vhodné vyměnit zpětné klapky na těchto trasách za takové, které mají nižší součinitel místní ztráty.

Posledním doporučením je zajištění pravidelného čištění zásobní nádrže od jemnozrnného materiálu, například při vypouštění nádrže. Tento krok by mohl vést k prodloužení životnosti čerpadel.

## 6 ZÁVĚR

Teoretická část této práce tvoří informační základ, který podmiňuje možnost samotných výpočtů. První oddíl teoretické části je věnován poměrně podrobnému popisu hydraulických okruhů v laboratořích Ústavu vodních staveb. Ve druhé části se práce zabývá především chováním kapaliny v trubní síti, ztrátám mechanické energie a teorií čerpadel.

V rámci praktické části této práce bylo zpracováno kompletní geometrické zaměření trubní sítě hydraulického okruhu laboratoře B112. Toho bylo využito pro tvorbu výkresové dokumentace současného stavu, který by měl do budoucna sloužit jako podklad pro plánování rekonstrukce.

Dále byl vytvořen matematický model pro výpočet Q-H charakteristiky jednotlivých tras trubní sítě hydraulického okruhu. Trasy byly voleny tak, že se měnily pouze výtlačná potrubí a kombinace křížení, ale koncová měrná trať byla vždy stejná.

Tento matematický model byl ověřen pomocí několika měření charakteristických bodů a vyhodnocen jako dostatečně přesný. Jednotlivé odchylky byly popsány a bylo nastíněno vysvětlení jejich vzniku.

Pro zpřesnění byla provedena analýza, porovnávající příspěvky jednotlivých ztrát mechanické energie na její celkovou hodnotu. Tato analýza potvrdila domněnky o pozorovaných odchylkách a v rámci kalibrace modelu byly provedeny kroky, které vedly k jeho výraznému zpřesnění.

Na konci praktické části byly nastíněny návrhy pro budoucí rekonstrukci čerpací stanice, a to především z pohledu navýšení její kapacity.

Do budoucna je plánováno zadání diplomová práce, která by měla zpracovávat kompletní návrh rekonstrukce, zahrnující výměnu čerpadel. Nutnost rekonstrukce vyplývá nejen ze stáří čerpadel, ale i z jejich stavu. Hlavním cílem bude vybrat taková čerpadla, která svými půdorysnými rozměry nebudou vyžadovat rozšíření stávající jímky, avšak umožní navýšení kapacitních možností čerpací stanice.

## 7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HLAVÍK, A. a PICEK, T. *Hydraulika potrubí* [online]. Praha, 2013 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/pre-dnasky/HY2V\\_04\\_Hydraulika\\_potrubi.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/pre-dnasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf). Skriptum. ČVUT.
- [2] HRUŠKA, J. *Čerpadla - Multimediální učební pomůcka* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: [http://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan\\_Hruska\\_MUC\\_soubory/page0001.htm](http://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan_Hruska_MUC_soubory/page0001.htm). Diplomová práce. Ostravská univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra technické a pracovní výchovy.
- [3] JUREČKA, M. *Erozivní účinky kavitace*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- [4] NOSKIEVIČ, J. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-030-0206-0.
- [5] JANDORA, J. a ŠULC, J. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [6] *Zenit: water solutions* [online]. Itálie: Zenit, 2017 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.zenit.com/en-US/Home>
- [7] BRADA, K. a HLAVÍNEK, P. *Čerpadla ve vodním hospodářství*. Brno: NOEL 2000, 2004. ISBN 80-860-2043-6.
- [8] MELICHAR, J. *Úvod do čerpací techniky*. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN ISBN978-80-01-05056-9.
- [9] MELICHAR, J a BLÁHA J. *Problematika soudobé čerpací techniky: vybrané partie*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN ISBN978-80-01-03719-5.
- [10] ŽOUŽELA, M. *Hydraulické okruhy laboratoře Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT v Brně. Vodní hospodářství* [online]. 2010, 06/2010, 2010(06), 175 - 178 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.vodnihospodarstvi.cz/ArchivPDF/vh2010/vh06-2010.pdf>
- [11] ŽOUŽELA, M *Modernizace čerpací stanice laboratoře Ústavu vodních staveb B-112*. Brno, 2009. Závěrečná zpráva. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.
- [12] *HAWLE ARMATURY spol. s r.o.* [online]. Praha: HAWLE, 2014 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.hawle.cz>
- [13] BOOR, B., KUNŠTÁTSKÝ, J. a PATOČKA, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968. ISBN (Váz.).

- [14] ŽOUŽELA, M. Výstavba a provoz nové laboratoře Ústavu vodních staveb. In: *Vodohospodářská konference 2003: Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně*. ECON publishing, 2003, 341 - 351. ISBN 80-86433-26-9.
- [15] CICHRA, R, ŠNELEROVÁ, M, ŽOUŽELA, M. Inovace čerpací stanice Laboratoře vodohospodářského výzkumu, Prováděcí projekt strojně technologické části, LVV – Fast – VUT v Brně, 2008
- [16] KUČERA, T. *Vodojemy a čerpací stanice*. Brno, 2017. Přednášky. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta stavební.
- [17] MILLER, Donald S. *Internal flow systems*. Cranfield, Bedfordshire: BHRA Fluid Engineering, 1978. ISBN 09-009-8378-7.
- [18] *Vodovod.info* [online]. ČR: Fakulta stavební, VUT v Brně, 2006 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.vodovod.info/>
- [19] VAG [online]. ČR: VAG, 2017 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: [www.vag-armaturka.cz](http://www.vag-armaturka.cz)
- [20] *Fabryka Armatur Jafar s.a* [online]. Poland: JAFAR, 2018 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [www.jafar.com.pl](http://www.jafar.com.pl)

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.2.3.1 Primární trubní složení měrné trati 1 .....	24
Tabulka 2.2.3.2 Primární trubní složení měrné trati 3 .....	25
Tabulka 2.2.3.3 Primární trubní složení měrné trati 4 .....	25
Tabulka 5.2.1 Hodnoty součinitelů místní ztráty .....	40
Tabulka 5.2.2 Výpočet místní ztráty na prvním úseku první trasy .....	41
Tabulka 5.2.3 Výpočet ztráty třením na třetím úseku první trasy .....	42
Tabulka 5.2.4 Sumační tabulka ztrát pro první trasu .....	43
Tabulka 5.2.5 Sumační tabulka ztrát pro druhou trasu .....	44
Tabulka 5.2.6 Sumační tabulka ztrát pro třetí trasu .....	45
Tabulka 5.2.7 Sumační tabulka ztrát pro čtvrtou trasu .....	46
Tabulka 5.3.1 Měřený charakteristický bod 1 .....	49
Tabulka 5.3.2 Měřený charakteristický bod 2 .....	50
Tabulka 5.3.3 Měřený charakteristický bod 3 .....	51
Tabulka 5.3.4 Měřený charakteristický bod 4 .....	52
Tabulka 5.6.3.1 Sumační tabulka ztrát pro trasu 1 po optimalizaci klapky a drsnosti .....	58



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Fotografie skříňového rozvaděče v laboratoři B112 .....	12
Obr. 2.1.2.1 Fotografie laboratoře B112, s třemi hydraulickými tratěmi .....	15
Obr. 2.2.1 Čerpadla Zenit při čištění jímky.....	19
Obr. 2.2.2 Skříňový rozvaděč s frekvenčními měniči.....	20
Obr. 2.2.3 Technologické schéma trubní sítě hydraulického okruhu.....	21
Obr. 2.2.1.1 Fotografie výtlačných potrubí .....	22
Obr. 2.2.2.1 Fotografie přechodu výtlačných potrubí na křížení .....	23
Obr. 3.2.1 Schéma odstředivého čerpadla.....	27
Obr. 3.2.1.1 Směr průtoku z leva: radiální, axiální a diagonální .....	27
Obr. 3.2.1.2 Schéma vertikálního axiálního hydrodynamického čerpadla .....	29
Obr. 3.2.2.1 Charakteristika tří čerpadel .....	30
Obr. 3.2.1.1 Kavitací rozrušený povrch .....	32
Obr. 4.2.1 Vliv překážky na rychlostní pole .....	34
Obr. 4.3.1 Část tabulky drsností.....	36
Obr. 5.2.1 Štítek čerpadla.....	47
Obr. 5.2.2 Charakteristiky prvního páru čerpadel .....	47
Obr. 5.2.3 Štítek čerpadla.....	48
Obr. 5.2.4 Charakteristiky druhého páru čerpadel .....	48
Obr. 5.6.1.1 Diagram závislosti ztrátového součinitele na průřezové rychlosti.....	56
Obr. 5.6.3.1 Graf závislosti změny tlaku na průtoku singularitou .....	58

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.2.1 Q-H charakteristika první trasy .....	43
Graf 5.2.2 Q-H charakteristika druhé trasy .....	44
Graf 5.2.3 Q-H charakteristika třetí trasy .....	45
Graf 5.2.4 Q-H charakteristika čtvrté trasy .....	46
Graf 5.3.1 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 1. trasa .....	49
Graf 5.3.2 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 2. trasa .....	50
Graf 5.3.3 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 3. trasa .....	51
Graf 5.3.4 Srovnání charakteristik a měřené hodnoty, 4. trasa .....	52
Graf 5.5.1 Analýza ztrát energie první trasy .....	54
Graf 5.5.2 Analýza ztrát energie třetí trasy .....	55
Graf 5.6.1.1 Výsledný graf po kalibraci ztrátového součinitele pro zpětnou klapku třetí trasy .....	57
Graf 5.6.2.1 Výsledný graf po kalibraci hodnoty drsnosti výtláčných potrubí první trasy.....	57
Graf 5.6.3.1 Kombinovaná optimalizace trasy 1 .....	59

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### ***Zkratky***

VUT ...	Vysoké Učení Technické
ČVUT ...	České Vysoké Učení Technické
FAST ...	Fakulta stavební
LVV ...	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
VŠKP ...	Vysokoškolská kvalifikační práce
ČS ...	Čerpací stanice
PID ...	proporcionální-integrační-derivační
PC ...	Počítač ( <i>Personal Computer</i> )
EE ...	Elektrická energie
MaR ...	Měření a regulace
PIV ...	Rovinná laserová anemometrie ( <i>Particle Image Velocimetry</i> )
Spol. s r.o. ...	Společnost s ručením omezeným

### ***Jednotky***

l ...	litr
s ...	sekunda
kg ...	kilogram
m ...	metr
m v. s. ...	metry vodního sloupce
W ...	Watt
ft ...	stopa ( <i>feet</i> )
Pa ...	Pascal

## ***Symboly***

H ...	Výška [m]
H <sub>z</sub> ...	Ztrátová výška [m]
H <sub>dopr</sub> ...	Dopravní výška [m v. s.]
H <sub>statická</sub> ...	Statická výška [m]
V ...	Objem [m <sup>3</sup> ]
Q ...	Průtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
n ...	Otáčky [n.min-1]
DN ...	Jmenovitá světlost ( <i>Diameter Nominal</i> ) [mm]
L ...	Délka [mm, m]
D ...	Průměr [mm, m]
NPSH ...	( <i>Net positive Suction Head</i> ) [m]
α ...	Coriolisovo číslo [-]
v ...	Průřezová rychlost [l.s <sup>-1</sup> ]
p ...	Tlak [Pa]
ρ ...	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]
g ...	Tíhové zrychlení [m.s <sup>-2</sup> ]
S...	Plocha [m <sup>2</sup> ]
Z...	celková ztráta energie [m v. s.]
Z <sub>t</sub> ...	ztráta třením [m v. s.]
Z <sub>m</sub> ...	ztráta místní [m v. s.]
ζ ...	součinitel místní ztráty [-]
λ ...	součinitel ztráty třením [-]
Re...	Reynoldsovo kritérium [-]
ν...	kinematická viskozita [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Δ...	hydraulická drsnost [m, mm]

## SEZNAM PŘÍLOH

1. Hydrotechnické výpočty (49 stran)
2. Půdorys čerpací stanice – dolní úroveň, M 1:20
3. Půdorys čerpací stanice – horní úroveň, M 1:20
4. Řez A-A' - Čerpadlo M1, M 1:20
5. Řez B-B' - Čerpadlo M3, M 1:20
6. Řez C-C' - Výtlačná potrubí M1 – M4, M 1:20
7. Technologické schéma